

Controlo de Tensão na Pré-Impregnação de Fibra de Carbono para Aplicações Aeroespaciais

Rúben da Silva Madureira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Doutor Fernando Gomes de Almeida

Orientador no INEGI: Doutor Luís Miguel Pereira Pina



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2017

*“Quem quer arranja soluções.
Quem não quer arranja desculpas.”*

Vasco Patarata

Resumo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver sistemas de controlo para uma máquina de pré-impregnação de fibras de carbono. Para isso, estudou-se detalhadamente esta máquina de modo a escolher os sistemas de controlo do processo que terão maior influência na qualidade dos materiais produzidos.

Assim, neste trabalho foi concebido, montado e testado um sistema de controlo de tensão de fibras de carbono durante um processo de pré-impregnação baseado num *dancer* composto por um cilindro pneumático que garante uma tensão constante desde que se mantenha dentro dos seus limites de operação. O valor da tensão nas fibras é diretamente proporcional à pressão que se impõe ao sistema pneumático utilizando uma válvula reguladora de pressão de alta precisão.

Foi também desenvolvido um sensor de posição de muito baixo atrito que utiliza fotorresistências e um elemento móvel que varia a luz recebida pelas mesmas por uma fonte luminosa, para monitorizar a posição do cilindro. Este sensor não tem uma característica linear, apresentando uma elevada sensibilidade na zona central do seu curso para onde foi definida a referência de posição para o *dancer*.

Utilizando uma placa de desenvolvimento de processador ATmega2560, foi feito o controlo da posição do cilindro atuando sobre a velocidade de um motor DC de escovas que ajusta a velocidade de desenrolamento das fibras. Foram testadas várias tipologias de PID para controlar a posição do cilindro, sendo que um controlador proporcional e integrativo com *anti-windup* foi a solução que apresentou melhor robustez.

O controlo de tensão das fibras é necessário para a produção de materiais compósitos de melhor qualidade e o equipamento desenvolvido, que custou, em termos de material, menos 84% do que o custo do sistema utilizado anteriormente, permitirá a sua replicação para utilização de mais do que um alimentador de fibra em simultâneo. Assim, será possível aumentar as capacidades da máquina de pré-impregnação para a produção de pré-impregnados híbridos.

Abstract

The objective of the present work is to develop process control systems for a carbon fibre pre-impregnation machine. The existing machine was analysed to select the process control systems with the most potential of improving the quality of the produced pre-impregnated materials.

Therefore, a fibre tension control system was conceived, developed, mounted and tested. This system is based on a dancer that is composed by a pneumatic cylinder which ensures the constant fibre tension as long as it is working inside the operational limits. The fibre tension value is directly proportional to the pressure that is defined for the pneumatic system using a high precision pressure control valve.

A very low friction linear position sensor was also developed. It uses photo-resistors and a moving element attached to the pneumatic cylinder to vary the intensity of the light incoming from a light source. This sensor has a nonlinear response, with a very high sensibility in the mid-range. Therefore, the reference position for the dancer is defined to be in the sensor mid-range.

An ATmega2560 based micro-controller platform was used to control the dancer's position, acting on the DC motor speed, which in turn defines the fibre velocity. Several PID controllers were tested for the dancer position, where the PI controller with anti-windup showed the greater robustness.

Fibre tension control is needed to improve the quality of the pre-impregnated materials. The developed equipment costed, in terms of raw materials and components, 84% less than the existing equipment. It is now possible to replicate this developed equipment to increase the existing machine capabilities, such as, allow the production of hybrid pre-impregnated composites.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, ao doutor Luís Pina e ao professor doutor Fernando Gomes de Almeida, por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada ao longo de toda a tese e por confiarem que chegaria a bom porto.

Agradeço também a todas os colaboradores do INEGI pela forma como me receberam e ajudaram, em especial: Jhonny Rodrigues, Fernando Silva, Bruno Sousa, Joana Prudêncio, Fábio Neto e Raquel Santos.

Agradeço a toda a minha família, o carinho e apoio. Em especial, agradeço aos meus pais, Manuel Adão e Ana Paula, por toda a confiança, educação e proteção que me permitiram chegar aqui; aos meus avós, Sr. Madureira, D.^a Sara e D.^a Eulália por poder receber isso em dose dupla, com o carinho especial que só os avós podem dar.

Agradeço a todos os meus amigos. Agradeço a companhia e amizade dos *Javalis* ou *Amigos do Fafes*, das *Altas Instâncias*, dos *Jolies* e dos *Amigos de Erasmus*. Uma palavra, em especial, para a Ângela Lacerda, o Daniel Silva, o Diogo Mendes, o Hugo João, o Jorge Cruz, o Luís Tiago, o Marco Guimarães, o Miguel Godinho, o Miguel Ribeiro, a Renata Dias, o Tiago Domingues e o Vasco Patarata, pela ajuda que me deram na dissertação com críticas, correções, apoio técnico e opiniões ao longo destes sete meses.

Palavra de apreço a todos aqueles que se banharam à luz do *Sol*, à sombra de *Palmeirum Leçæ*.

Finalmente, agradeço o financiamento através do projeto *ModComp –Modified cost effective fibre based structures with improved multi-functionality and performance* (Project ID: 685844), financiado pela União Europeia no contexto de “H2020-EU.2.1.3. - INDUSTRIAL LEADERSHIP - Leadership in enabling and industrial technologies - Advanced materials

The authors gratefully acknowledge the funding of Project ModComp -Modified cost effective fibre based structures with improved multi-functionality and performance (Project ID: 685844), financed and supported by European Union under “H2020-EU.2.1.3. - INDUSTRIAL LEADERSHIP - Leadership in enabling and industrial technologies - Advanced materials

Índice

Resumo.....	iii
Abstract	v
Agradecimentos.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas	xvii
1. Introdução	1
1.1. Âmbito e Motivações	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodologia	4
1.4. Contribuições	4
1.5. Estrutura da Dissertação.....	5
2. Controlo Automático de Tensão	7
2.1. Vantagens do Controlo de Tensão	7
2.2. Técnicas de Controlo de Tensão	9
3. Máquina de Pré-Impregnação	15
3.1. Enrolador.....	16
3.1.1. Motor de Indução Trifásico.....	18
3.1.2. Variador de Frequência	20
3.2. Alimentador.....	22
3.3. Bloco de Impregnação.....	23
3.4. Bloco de Controlo	24
3.4.1. Comunicação HMI – PLC.....	26
3.4.2. Comunicação PLC – Drivers.....	27
3.4.3. Comunicação Drivers – Motores.....	30
4. Solução Adotada	33
4.1. Desenrolador	34
4.2. Controlador de Tensão	40
4.3. Sensor de Posição.....	43
Potenciómetro	44
LVDT	45
Magnetostriectivo.....	46
Sensor Laser e Ultrassónico	47

Sensor de Fotorresistências	48
4.4. Célula de Carga	57
5. Implementação e Montagem	59
5.1. Dancer	59
5.2. Desenrolador	64
5.3. Eletrónica	65
5.4. Programação.....	71
5.5. Estrutura final.....	73
6. Resultados Experimentais	75
6.1. Medição de Tensão.....	75
6.2. Controlador	77
6.2.1. Controlador P, PI e PID.....	79
6.2.2. Melhorias no Controlo Proporcional	84
6.2.3. Melhorias no Controlo Proporcional-Integral	88
7. Conclusões	93
Referências	95

Anexos:

Anexo A: Programação de Controlo PID da Placa de Desenvolvimento

Anexo B: Programação do *Driver*

Anexo C: Implementação de Função Anti-Windup

Anexo D: Ficha Técnica do Motorreductor Utilizado

Anexo E: Ficha Técnica do *Driver* Utilizado

Anexo F: Ficha Técnica da Fonte de Alimentação Utilizada

Anexo G: Catálogo do Cilindro Pneumático Utilizado

Anexo H: Catálogo da Válvula Reguladora de Pressão de Precisão Utilizada

Anexo I: Ficha Técnica das Fotorresistências Utilizadas

Índice de Figuras

Figura 1 - Mapa da tensão no limite elástico por massa volúmica de alguns materiais. Gráfico retirado de CES Edupack 2014 [5].....	2
Figura 2 - Ilustração da impregnação das fibras [9]. B é a resina que penetra nas fibras, A é a resina que fica no impregnado produzido, mas não está em contacto com as fibras, C é a quantidade de resina desperdiçada durante o processo.	8
Figura 3 - Esquema da variação da tensão com o raio ao longo do processo de desenrolamento.	10
Figura 4 - Exemplo de controlo manual da tensão da fibra.....	10
Figura 5 - Exemplo da evolução da tensão num processo de controlo manual.....	11
Figura 6 - Exemplo de um erro possível do controlo manual de tensão.	11
Figura 7 - Soluções de controlo em malha aberta.	12
Figura 8 - Ilustração do controlo em malha fechada que recorre a células de carga.....	13
Figura 9 - Exemplo de controlo de tensão em malha fechada com utilização de dancet.	14
Figura 10 - Ilustração do processo de pré-impregnação.....	15
Figura 11 - Fotografia da máquina de pré-impregnação com identificação dos blocos operacionais.	15
Figura 12 - Fotografia do bloco Enrolador da máquina de pré-impregnação.	16
Figura 13 - Placa das características do motor de indução trifásico do enrolador de pré-impregnado.....	17
Figura 14 - Ilustração do funcionamento de um motor de indução trifásico.....	18
Figura 15 - Curva velocidade-binário característica genérica de um motor de indução trifásico. Figura adaptada de [21].....	19
Figura 16 - Ilustração do funcionamento de um variador de frequência genérico. Imagem adaptada de [23].	20
Figura 17 - Variação de alguns parâmetros funcionais de um motor de indução trifásico em controlo escalar V/f, com a variação da frequência de alimentação. Imagem adaptada de [21].	21
Figura 18 - Desenrolador com rolo de fibra de carbono.	23
Figura 19 - Fotografia do bloco de impregnação.	23
Figura 20 - Fotografia da caixa elétrica da máquina com respetiva legenda.	25
Figura 21 - Diagrama de comunicações entre componentes responsáveis pelo controlo da máquina.	25
Figura 22 - Gráfico da velocidade pedida para o tambor-frequência do sinal enviado do PLC para o variador de frequência do motor do enrolador.	27
Figura 23 - Gráfico da frequência enviado para o driver do servomotor para dois valores diferentes de passo.	28
Figura 24 - Gráfico coeficiente função do passo configurado.	29
Figura 25 - Frequência do sinal enviado pelo PLC, função da velocidade linear necessária para o servomotor respeitar um dado passo.	29
Figura 26- Curvas V/f configuradas no "VFD" do motor de indução do enrolador.	30
Figura 27 - Ilustração das dimensões e solicitações importantes para o dimensionamento do desenrolador	34
Figura 28 - Princípio de funcionamento de um motor DC com escovas e íman permanente.	37
Figura 29 - Gráfico das curvas características de um motor DC de íman permanente genérico, para tensão constante.	37

Figura 30 - Ilustração dos 4 quadrantes de funcionamento de um motor.	38
Figura 31 - Seleção efetuada das tabelas dos catálogos dos motorreductores da Kelvin Gear [27].	39
Figura 32 - Curva característica velocidade-binário do motorreductor escolhido. A verde está sombreada a zona de funcionamento do alimentador.	39
Figura 33 - Ilustração da variação de direção de desenrolamento ao longo que o rolo é consumido.	40
Figura 34 - Ilustração dos esforços no dancer pretendido implementar.....	41
Figura 35 - Escolha do diâmetro do cilindro pneumático de baixo atrito pelas tabelas do fornecedor SMC [31].	42
Figura 36 - Curva característica caudal-pressão a jusante da válvula escolhida para o dancer [32].	42
Figura 37 - Circuito pneumático do dancer. Inclui a unidade de tratamento de ar (1), o cilindro pneumático de baixo atrito (2), a válvula reguladora de pressão (3) e o medidor de pressão (4).	43
Figura 38 - Divisor de tensão, o princípio de funcionamento de um sensor de posição resistivo	44
Figura 39 - Circuito elétrico básico de um LVDT.	45
Figura 40 - Variação do sinal de saída em amplitude de um LVDT com a posição do núcleo. A posição 0 equivale à posição central, e -1 e 1 às duas posições extremas.....	45
Figura 41 - Circuito elétrico de um divisor de tensão composto por uma fotoresistência.	49
Figura 42 - Ilustração do funcionamento do sensor.	49
Figura 43 - Fotorresistências dispostas numa calha no interior da caixa preta do transdutor	51
Figura 44 - Placa de material difusor para homogeneizar a luz no interior da caixa preta.	51
Figura 45 - Os leds foram colocados dois a dois ao longo de uma calha.....	51
Figura 46 - Aspeto final do transdutor, com o elemento móvel já no interior da caixa, à direita.	52
Figura 47 - Corte transversal do sensor em modelação 3D.....	52
Figura 48 - Ficha D9 macho que serve de interface com o sensor. A legenda identifica cada uma das portas. As portas par não são utilizadas.	53
Figura 49 - Circuito elétrico simplificado do sensor. Os números correspondem à identificação dos pinos da ficha D9 da Figura 48.....	53
Figura 50 - Característica do transdutor de deslocamento produzido.	54
Figura 51 - Característica do sensor aproximadamente linear para uma zona de funcionamento entre os 60 a 80 mm.	55
Figura 52 - Gráfico da medição função do valor lido pela placa de desenvolvimento. A equação característica foi aproximada a uma equação polinomial de 3º grau.	56
Figura 53 - Indicação dos locais onde interessa medir a tensão da fibra.	57
Figura 54 - Rolo e célula de carga radial para medição de tensão da Honigmann [42].	58
Figura 55 - Fotografias da estrutura completa do dancer, que inclui os elementos necessários ao seu funcionamento.	60
Figura 56 - Gráfico de correspondência de Tensão da Fibra e pressão na válvula de precisão. .	63
Figura 57 - Fotografia do desenrolador com legenda.....	64
Figura 58 - Fotografia dos elementos da eletrónica do sistema desenvolvido.	65
Figura 59 - Diagrama das comunicações existentes no sistema.	66
Figura 60 - Diagrama de um circuito possível para produzir um sinal pwm de 24V para controlo da velocidade. Circuito integrado TIL111 da Fairchild dentro do quadrado a traço interrompido.	70

Figura 61 - Fluxograma do algoritmo de controlo PID de posição do Dancer.	71
Figura 62 - Fluxograma do algoritmo de funcionamento do driver do motor.....	72
Figura 63 - Fotografia legendada da estrutura final do sistema de controlo de tensão da fibra. .	73
Figura 64 - Estrutura utilizada para medir a tensão da fibra.	75
Figura 65 - Diagrama de corpo livre da roldana montada no dinamómetro.	76
Figura 66 - Teste completo de um controlador P para 5 N de tensão de fibra.	77
Figura 67 - Diagrama de blocos do sistema em controlo malha fechada.	79
Figura 68 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para 0 rpm e 5 N.	81
Figura 69 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para o teste a 0 rpm e 50 N.	81
Figura 70 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 1 rpm e 5 N.	82
Figura 71 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 1 rpm e 50 N.	82
Figura 72 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 3 rpm e 5 N.	83
Figura 73 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 3 rpm e 50 N.	83
Figura 74 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 0 rpm e 5 N.	85
Figura 75 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 0 rpm e 50 N.	85
Figura 76 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 1 rpm e 5 N.	86
Figura 77 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 1 rpm e 50 N.	86
Figura 78 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 3 rpm e 5 N.	87
Figura 79 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 3 rpm e 50 N.	87
Figura 80 - Demonstração do problema da sobre-elongação do controlador PI	88
Figura 81 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada com função de anti-windup.	89
Figura 82 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 0 rpm e 5 N.	90
Figura 83 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 0 rpm e 50 N.	90
Figura 84 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 1 rpm e 5 N.	91
Figura 85 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 1 rpm e 50 N.	91
Figura 86 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 3 rpm e 5 N.	92
Figura 87 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 3 rpm e 50 N.	92

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação de caraterísticas de um Aço, de um pré-impregnado e respetivos materiais componentes isolados. Valores retirados de CES Edupack 2014 [5].....	2
Tabela 2 - Correspondência Tensão-Frequência do controlo escalar V/f do motor de indução trifásico do enrolador.	30
Tabela 3 - Custos das componentes do alimentador implementado.....	40
Tabela 4 - Custo dos componentes pneumáticos necessários para produzir o dancer.	43
Tabela 5 - Dados sobre algumas caraterísticas do sensor KITPL145 da Vishay [25].....	44
Tabela 6 - Dados sobre algumas caraterísticas do LVDT E 2000 da Measurement Specialties [34].	46
Tabela 7 - Dados sobre algumas caraterísticas do LVDT DC-DC [35].	46
Tabela 8 - Dados sobre algumas caraterísticas do sensor magnetostrictivo [37].	47
Tabela 9 - Dados sobre algumas caraterísticas do sensor laser [38].	47
Tabela 10 - Dados sobre algumas caraterísticas do sensor supersónico [39].	48
Tabela 11 - Lista de preços das componentes do sensor de posição.	57
Tabela 12 - Orçamento do equipamento necessário para medir a tensão da fibra.	58
Tabela 13 - Correspondência Tensão da Fibra e pressão na válvula de precisão.....	63
Tabela 14 - Designação e função dos pinos de uma tomada D9 numa ligação em série RS232 [44], [45].	67
Tabela 15 - Correspondência de pinos entre dois terminais ligados por um Partial Hand-shaking Null Modem [46].	68
Tabela 16 - Medições de tensão durante os testes do controlador.	76
Tabela 17 - Erros de pressão e tensão máximos provocados por perturbações efetuadas durante os testes.	78
Tabela 18 - Parâmetros de controlo dos controladores testados.....	80

Lista de Abreviaturas

d	Diâmetro [m]
F	Força ou Tensão de Fibra [N]
f, f_e	Frequência, Sinal em frequência de comando da velocidade do enrolador [Hz]
HMI	Interface Homem-Máquina
I, I_n	Intensidade de Corrente, Intensidade de Corrente Nominal [A]
$INEGI$	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
Kd	Constante de Ganho Derivativa [s^{-1}]
Ki	Constante de Ganho Integral [s]
Kp	Constante de Ganho Proporcional
n, n_s	Velocidade angular, Velocidade de sincronismo [rpm]
P, P_n	Potência, Potência Nominal [W]
P	Pressão [Pa] ou Passo [m/rotação]
PLC	Controlador Lógico Programável
s	Escorregamento
T, T_n, T_t	Binário, Binário Nominal, Binário do Tambor de Enrolamento, [Nm]
V	Tensão Elétrica [V]
v	Velocidade linear [m/s]
VFD	Variador de Frequência
w	Velocidade angular [rad/s ou rpm]
φ	Fluxo no Entreferro [Wb]
η	Rendimento

1. Introdução

1.1. Âmbito e Motivações

A Humanidade está em constante desenvolvimento e todos os dias supera-se com novas tecnologias. Novos e melhores materiais permitem ao Homem ir mais longe nas suas capacidades e atingir feitos julgados impossíveis. Muitas vezes a tecnologia está limitada pelos materiais possíveis de utilizar e o seu potencial pode ser limitado pelos próprios processos de fabrico. Não é suficiente saber produzir um material, é necessário fazê-lo bem, com qualidade e tornando a produção viável e sustentável, económica e ecologicamente. Melhorar os processos de fabrico ou desenvolver métodos alternativos permite a busca de melhor qualidade e menor custo.

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais diferentes, distinguíveis por uma interface, que aliam as boas qualidades dos seus componentes para um fim previsto. Estes materiais são conhecidos e utilizados há vários milhares de anos. Por exemplo, utilizava-se palha para fazer “tijolos” de argila para ajudar a manter a sua forma enquanto secavam. Os materiais compósitos avançados surgiram no século XX, com os primeiros polímeros reforçados por fibra, que foram aplicados na indústria aeroespacial após a Segunda Grande Guerra e permitiram avanços que a madeira e outros materiais até esse momento utilizados na aviação não permitiam [1].

Existe uma variedade elevada de materiais compósitos. São muitas vezes classificados pela natureza dos elementos que o compõem e pela forma como eles se apresentam. Um dos constituintes é chamado reforço ou fase dispersa. Esta pode-se encontrar sobre a forma de fibras contínuas, descontínuas, partículas ou tecido, embebida numa fase contínua chamada matriz que também pode ser de diversos materiais. Um dos tipos mais comuns são os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibra contínua.

Uma das vantagens dos compósitos de matriz polimérica é possuírem elevadas características mecânicas associadas a maior leveza do que outros materiais. Tal pode ser verificado na Figura 1 onde se apresenta um mapa de massa volúmica e de tensão limite elástico pondo em comparação materiais compósitos e três metais e respetivas ligas, o Aço, o Alumínio e o Titânio, largamente utilizados. A resistência específica ou outras características mecânicas por unidade de massa de material são muito procuradas em certas indústrias como o sector aeroespacial e os materiais compósitos são exímios nesse aspeto.

Não são só as propriedades mecânicas que tornam estes materiais especiais. Estes podem ainda possuir boas características térmicas e elétricas, e apresentar boas resistências à corrosão e às condições ambiente. Destaca-se, assim, também, a sua durabilidade sendo possíveis de utilizar em ambientes extremamente difíceis para os metais, como o ambiente marinho [1]–[4].

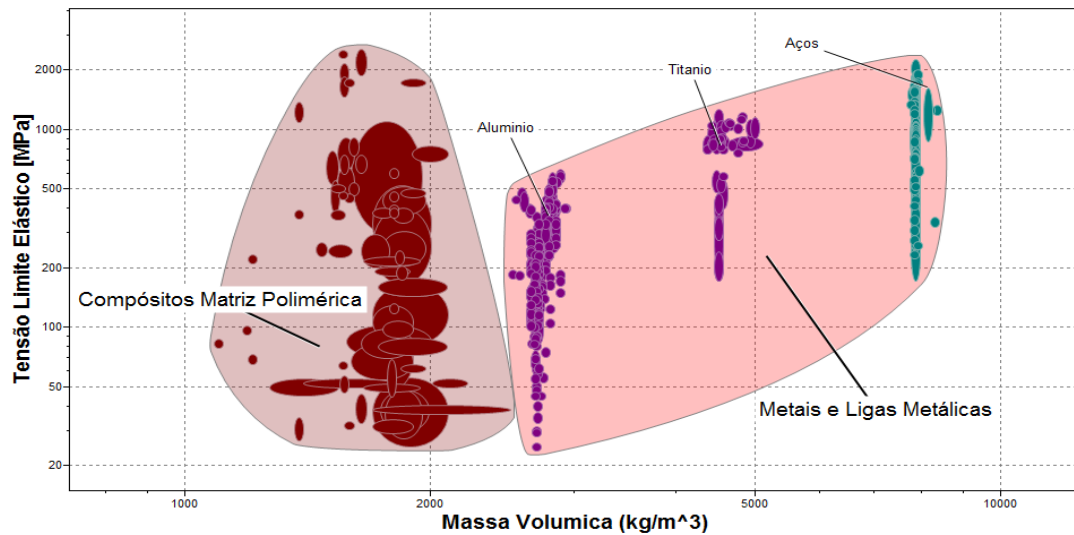


Figura 1 - Mapa da tensão no limite elástico por massa volúmica de alguns materiais. Gráfico retirado de CES Edupack 2014 [5].

A fibra é o elemento resistente do material compósito, isto é, fornece resistência mecânica ao material, permitindo assim a sua utilização em aplicações sujeitas a elevadas cargas. A resina acrescenta tenacidade e coesão ao material e, por outro lado, distribui as cargas entre as diversas fibras e protege-as do ambiente circulante [2]. Assim, quanto maior for a fração volúmica de fibra, melhores serão as características mecânicas do material compósito, salvaguardando que existe matriz suficiente para manter a integridade do material.

Tabela 1 - Comparação de características de um Aço, de um pré-impregnado e respetivos materiais componentes isolados. Valores retirados de CES Edupack 2014 [5].

Material		AISI 1010	Epóxido + Fibra de Carbono		Epóxido	Fibra de Carbono	
			0°	90°		HS	HM
Massa específica [kg.m ⁻³]		7800	1550		1110	1800	1800
		7900	1580		1400	1840	1850
Deformação após rotura [%]		29	1,2	0,55	3	2	1,8
		45	1,4		6	2,2	2
	Absoluto [MPa]	205	129	8,5	2,35	225	370
		215	154		2,,47	245	390
	E / ρ [MPa / kg.m ⁻³]	0,026	0,082	0,005	0,002	0,122	0,2
		0,028	0,099			0,133	0,217
	Absoluto [MPa]	310	1740	46,8	45	3750	1910
		430	2170	56,7	89,6	4000	2110
	σ _r / ρ [MPa / kg.m ⁻³]	0,039	1,101	0,030	0,032	2,038	1,032
		0,055	1,400	0,037	0,081	2,222	1,172
Coeficiente de dilatação linear [10 ⁻⁶ K ⁻¹]		11,5	-0,44	0,36	81	0,2	0,2
		13	0,16	4,02	117	0,4	0,4
Resistência ao impacto [kJ/m ²]		-	154	2	1,2	-	-
			188	4	5,3		

A Tabela 1 mostra, uma vez mais, a competitividade dos pré-impregnados com os aços. Estão também tabeladas as características de um pré-impregnado de matriz epoxídica reforçada por fibras de carbono e ambos os constituintes sozinhos. A mesma tabela revela uma das características importantes dos materiais compósitos com reforço de fibra: o anisotropismo, que é a dependência das características do material com a direção. Isto significa que são necessários cuidados no posicionamento das fibras para se conseguir retirar o melhor proveito das elevadas propriedades das mesmas, orientando-as e posicionando-as, convenientemente. Por outro lado, verifica-se uma situação que pode levantar questões: os coeficientes de dilatação térmica da fibra e da matriz são muito diferentes, isso pode originar problemas de incompatibilidade entre os materiais durante e após cura.

A cura é o processo segundo o qual os polímeros formam as ligações entre as várias cadeias de monómeros e assim se solidificam, irreversivelmente ou não, dependendo da natureza da matriz, se é termoendurecível ou termoplástica, respetivamente.

Os pré-impregnados são um tipo específico de material compósito em que o processo de fabrico é “interrompido”. A sua matriz não concluiu a cura e é, assim, permitido um maior controlo e rigor na sua produção permitindo peças e componentes com características mais homogêneas e otimizadas, daí serem um material particularmente aliciante no mercado aeroespacial.

Os pré-impregnados podem ser fornecidos sobre a forma de laminados. Assim, podem ser armazenados e mais tarde utilizados na aplicação pretendida passando por outro tipo de processos que fornecem a forma e características mecânicas definitivas ao material após completada a cura a elevadas temperatura e pressão.

Ora, durante as variações de temperatura do material podem formar-se tensões residuais que o enfraquecem. Outro fator que pode enfraquecer o material são poros ou vazios na matriz, devido à fraca adesão entre os materiais resultantes da tensão superficial ou da viscosidade da resina em contato com a fibra. Como os pré-impregnados são fabricados antes da sua aplicação, podem ser produzidos sob condições mais específicas e cuidadas, permitindo assim controlar certos parâmetros de produção que permitem um maior refinamento das propriedades pretendidas [1]–[3]. Esses parâmetros podem ser muito variados como a velocidade de impregnação, a temperatura da resina, posição e direção da fibra no laminado, tensão da fibra, entre outros. Torna-se importante ter meios de os monitorizar e controlar para assim produzir o melhor laminado possível com características otimizadas para a aplicação em causa.

No Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), existe uma máquina de pré-impregnação, já com várias adaptações para controlo de outros parâmetros relevantes na produção de pré-impregnados.

Surge, assim, em contexto de dissertação para conclusão de curso do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada em ambiente empresarial, a oportunidade de desenvolver um mecanismo de monitorização e controlo da tensão da fibra, assim como um sistema de alimentação das fibras modular e de baixo custo. Tal permitirá a utilização de vários mecanismos para produção de pré-impregnados alimentados com mais do que uma fibra e, eventualmente, introduzir a produção de materiais compósitos híbridos, com mais do que um tipo de fibra, e cada vez mais complexos.

Esta dissertação apresenta os passos tomados na conceção e implementação desses sistemas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de controlo que melhore a qualidade dos pré-impregnados produzidos pela máquina de pré-impregnação existente no INEGI. Após um estudo dos vários sistemas de controlo do processo que poderiam ser desenvolvidos, escolheu-se como mais importante um sistema de alimentação de fibras com controlo de tensão das mesmas. Este sistema é muito importante, por exemplo, para controlar a quantidade de resina do pré-impregnado e, portanto, a qualidade final do mesmo. Este sistema, também, deverá ser replicável para ser possível produzir pré-impregnados híbridos, utilizando simultaneamente diferentes tipos de fibras.

Pretende-se então o desenvolvimento de um mecanismo com capacidade de controlar a tensão das fibras de carbono à saída do desenrolador com o mínimo de influência no resto do funcionamento da máquina. Para isso será necessário conceber, projetar e implementar o mecanismo de alimentação das fibras com controlo da respetiva tensão.

É ainda objetivo que todos os componentes utilizados sejam de baixo custo, modulares e independentes, para, no futuro, serem implementados processos de fabrico alternativos como pré-impregnação de mais do que uma fibra e até combinação de materiais diferentes.

1.3. Metodologia

Para concretizar os objetivos propostos é necessário estudar a máquina de pré-impregnação do INEGI, escolher o sistema de controlo com mais impacto na qualidade dos materiais produzidos e adequado para realização no âmbito de uma dissertação de Mestrado.

Depois de selecionar o sistema de controlo de tensão na alimentação das fibras, será necessário estudar soluções semelhantes utilizadas em outras aplicações, estabelecer o conceito para o mecanismo de controlo de tensão das fibras, dimensionar e selecionar os componentes, montar o mecanismo e testá-lo em condições de operação relevantes.

1.4. Contribuições

Neste trabalho foi desenvolvido um alimentador de fibra modular para um processo de pré-impregnação com respetivo controlo de tensão através de um *dancer* de cilindro pneumático. Será possível, quando se demonstre necessário, montar mais alimentadores de fibra de baixo custo, para produzir pré-impregnados com mais do que um tipo de fibra.

Será possível também utilizar este alimentador em outros processos de fabrico de materiais compósitos, como a pultrusão e o enrolamento filamentar.

1.5. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação descreve os passos realizados, e respetiva justificação, no desenvolvimento do mecanismo de monitorização e controlo da tensão da fibra. É exposto o conteúdo teórico necessário à compreensão de todos os conceitos utilizados, e é apresentado todo o processo de desenvolvimento e montagem do mecanismo. Finalmente, são apresentados os resultados dos ensaios realizado assim como a respetiva análise e propostas de melhoria.

No Capítulo 1, foram apresentados o contexto e as motivações para a realização deste trabalho, os objetivos a cumprir e a metodologia utilizada.

No Capítulo 2, é fundamentada a necessidade de controlo de tensão num processo de pré-impregnação e é feito um levantamento das tecnologias existentes semelhantes ao que será necessário desenvolver.

No Capítulo 3, são apresentados, detalhadamente, os componentes da máquina de pré-impregnação, dividida por blocos operacionais. São estabelecidos os melhoramentos a efetuar, assim como os parâmetros de funcionamento desejados. Quando pertinente são expostas contextualizações teóricas para a melhor compreensão do seu funcionamento.

O Capítulo 4 apresenta soluções estudadas para o controlo de tensão com devida justificação. Para a solução escolhida é exposto em detalhe o seu projeto e dimensionamento.

O Capítulo 5 é dedicado à implementação do sistema com relato dos problemas que surgiram e respetivas soluções.

O Capítulo 6 foca-se nos resultados dos testes efetuados ao sistema desenvolvido com a devida análise. São descritos os ajustes necessários aos algoritmos e parâmetros de controlo para o correto funcionamento do sistema.

Por fim, o Capítulo 7 resume as conclusões a retirar desta dissertação e propõe ações a desenvolver no seguimento deste trabalho para otimizar o sistema de controlo desenvolvido.

2. Controlo Automático de Tensão

2.1. Vantagens do Controlo de Tensão

Antes de descobrir as tecnologias mais atuais de controlo de tensão, é necessário avaliar a sua necessidade nos pré-impregnados.

Na indústria dos pré-impregnados, nem sempre se produz laminados. O material pode ser pré-impregnado para, de seguida, ser usado para enrolamento filamentar ou pultrusão. Estes dois processos são diferentes no sentido em que o enrolamento filamentar permite criar peças de revolução em material compósito, como reservatórios de alta pressão, e a pultrusão permite produzir peças de secção constante, como vigas ou perfis.

Vários parâmetros de fabrico influenciam o pré-impregnado obtido, como a velocidade de impregnação, temperatura, propriedades da resina e da fibra utilizada, entre outros.

Mertiny e Ellyin verificaram que a tensão está diretamente ligada à fração volúmica de fibra [6]. As fibras, como já foi referido, são a componente que fornece resistência ao material, sendo a matriz o material frágil que irá ceder primeiro, no material compósito. Assim sendo, não é do interesse do produtor excesso de resina pois tenderá a enfraquecer o pré-impregnado.

Nesse estudo observou-se que é possível um aumento, em valores relativos, de 4% da fração volúmica da fibra, para um aumento de tensão, de aproximadamente, 100%. O mesmo estudo testou tubos de material compósito produzidos por enrolamento filamentar a diferentes tensões de enrolamento e verificou comportamentos diferenciados quanto à rotura. Enquanto que, de forma geral, uma maior fração volúmica demonstrou uma maior tensão de rotura, isso não é necessariamente verificado em todas as situações, mas, independentemente dos benefícios ou prejuízos da pré-tensão aplicada, é factual a dependência dessas propriedades da tensão aplicada nas fibras durante o enrolamento filamentar [6].

Outro estudo, dos mesmos autores, revelou a influência da tensão na largura do material enrolado, sendo menor para maior tensão, com reduções de até 4% da largura para um aumento de tensão de 100%. Este parâmetro é importante no controlo do passo do enrolamento, para evitar que a fibra se sobreponha ou fique espaçada incorretamente [7].

Wang e a sua equipa demonstraram que o aumento de número de peças de uma máquina de impregnação, em contacto com a fibra leva a um aumento da força de enrolamento [8], como é de prever devido ao aumento do atrito. Este estudo confirma a experiência dos técnicos que produzem os pré-impregnados que mais rolos fazem a fibra perder resina e aumentar a resistência do pré-impregnado, condicente com os estudos de Mertiny e Ellyin [6], [7].

James Seferis e Kyu Jong Ahn [9] fizeram vários estudos sobre os parâmetros que influenciam as suas características e formularam diversos números adimensionais para analisar a qualidade de pré-impregnados.

As forças efetuadas na fibra estão diretamente ligadas ao aumento da largura da fibra durante o processo de impregnação, sendo o aumento da largura da fibra menor quando a tensão da fibra é maior, como se verifica pela seguinte equação:

$$\frac{1 - e}{e^3} = \frac{d \times C_f \times K_t \times N_t \times r_f^2}{W_i^2} \times \frac{F_3}{F_1}$$

Sendo: e a razão de larguras da fibra antes e depois de impregnação, $e = W_f/W_i$, sendo W_f a largura da fibra após impregnação e W_i a largura antes da impregnação; C_f , constante relacionada com a porosidade da fibra; K_t , uma constante relacionada com o tamanho da fibra; N_t , o número de filamentos por fibra; r_f , o raio de cada filamento. Estes coeficientes são constantes dependentes da matéria prima utilizada para produzir o pré-impregnado.

Por outro lado, d , relacionada com a distância entre peças genéricas da máquina em contacto com a fibra que produz o impregnado, também será constante. F_3 é a força perpendicular à fibra e F_1 é a tensão da fibra.

Esta equação é coerente com as conclusões de Mertiny e Ellyin, indicando que um correto controlo de tensão permite controlar a largura da fibra no enrolamento filamentar.

A razão de larguras é utilizada na definição de outro parâmetro, a eficiência do processo de impregnação, $E_g = f \times e$, que é o produto da razão de larguras pela percentagem de resina impregnada na fibra, dado por:

$$f = \frac{B}{A + B + C}$$

A é a massa de resina que envolve a fibra, B é a massa de resina que penetrou a fibra e C é a massa da restante resina que foi desperdiçada, como ilustra a Figura 2, retirada do artigo de Seferis e Ahn [9].

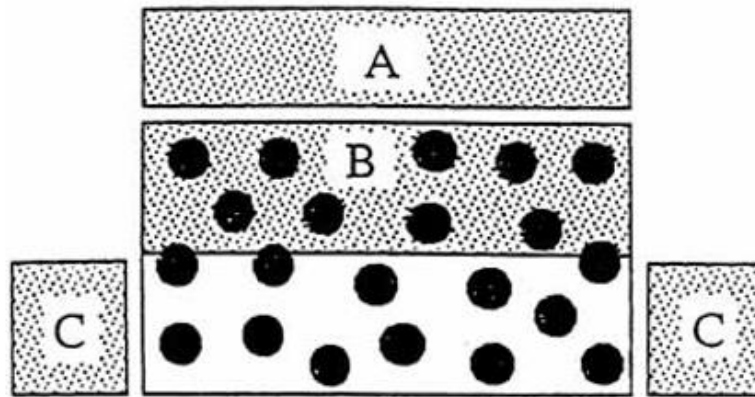


Figura 2 - Ilustração da impregnação das fibras [9]. B é a resina que penetra nas fibras, A é a resina que fica no impregnado produzido, mas não está em contacto com as fibras, C é a quantidade de resina desperdiçada durante o processo.

Estes autores não mencionam ou não estudam o efeito da tensão neste parâmetro f , mas como vimos antes, e nomeadamente nos estudos de Mertiny e Ellyin, a tensão influencia a quantidade de resina na fibra. Sendo f uma forma de analisar a quantidade útil de resina no pré-impregnado, é intuitivo que um correto controlo de tensão irá aumentar f . Assim conclui-se que um correto

controlo de tensão terá também influência na eficiência da impregnação através dos dois parâmetros que a permitem calcular.

Ainda relacionável com este parâmetro f , a impregnação ou a penetração da resina nas fibras está também relacionada com a tensão e influencia as propriedades mecânicas do pré-impregnado. Se a resina não penetrar bem na fibra, ir-se-ão formar vazios que enfraquecem o material.

A equipa de Peltonen verificou que aumentar a tensão em três vezes o seu valor permite aumentar a impregnação de 75% para 92%, uma redução de 17% de vazios existentes [10]. Em materiais compósitos unidireccionais, foram observadas reduções de 10% da tensão limite à compressão, para o aumento em 1% dos vazios [11].

Aleong e Munro, por sua vez, detetaram que um correto controlo da tensão das fibras durante o processo permite reduzir as tensões residuais em processos de enrolamento filamentar [12]. Tensões residuais, nos pré-impregnado laminados, são prejudiciais pois podem provocar imprecisões dimensionais ou de forma, ou reduzir as capacidades mecânicas do material. As tensões residuais podem surgir, por exemplo, por causa dos coeficientes de expansão térmica dos materiais serem de valores diferentes [13]. Portanto, se as fibras são sujeitas a esforços de compressão, uma pré-tensão adequada será capaz de diminuir as tensões residuais [14]. Foram observadas reduções até 20% da tensão radial residual depois de aumentarem 100% a tensão [12].

2.2. Técnicas de Controlo de Tensão

A indústria dos materiais compósitos, geralmente, está encoberta de segredo industrial devido à importância tecnológica e económica que as tecnologias envolvidas possuem, e grande parte dessa tecnologia é pouco divulgada para proteger os interesses dos proprietários intelectuais.

Em indústrias diferentes e bastante mais antigas que a indústria dos materiais compósitos como a indústria papelreira ou têxtil, é exigido, também, controlo da tensão da matéria-prima ou do produto final em processos que envolvam enrolamento e desenrolamento para evitar ou resolver problemas comuns.

Não sendo indústrias tão exigentes a nível da performance dos materiais com que trabalham, uma tensão elevada pode provocar roturas no produto e interrupções de produção do papel ou do tecido, por exemplo. Tensão demasiado baixa pode provocar desvios, enrolamentos defeituosos com formação de rugas ou levar a que o material fique acidentalmente engatado em componentes da máquina e seja necessário parar a operação para reparar os problemas. Tensão variável pode dar origem a produto excessivamente heterogéneos ou defeitos na operação como por exemplo impressões distorcidas [15]–[17].

Variações de diâmetro do enrolador e desenrolador são uma das origens dos problemas que levam à necessidade de controlo de tensão dos materiais e produtos fabricados.

Por exemplo, num processo de desenrolamento, se o binário se mantiver constante, à medida que a fibra vai sendo consumida e o rolo diminuindo de diâmetro, a tensão no desenrolamento vai aumentar, uma vez que a tensão é função do raio. A Figura 3 retrata este fenómeno.

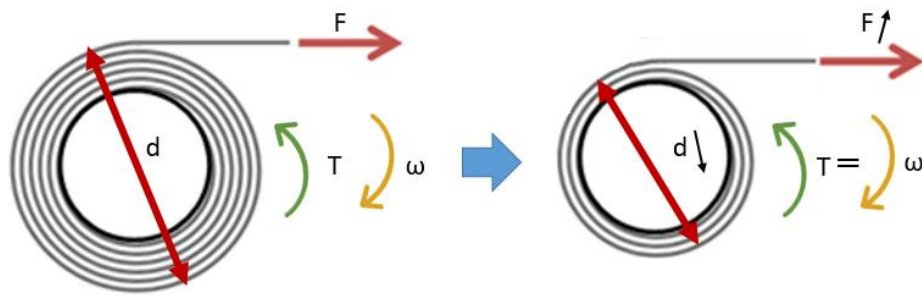


Figura 3 - Esquema da variação da tensão com o raio ao longo do processo de desenrolamento.

Uma maneira muito simples de resolver o problema é, manualmente, ajustar os parâmetros dos motores em funcionamento para ajustar o binário e, conseqüentemente, a tensão dos materiais, como representado na Figura 4.

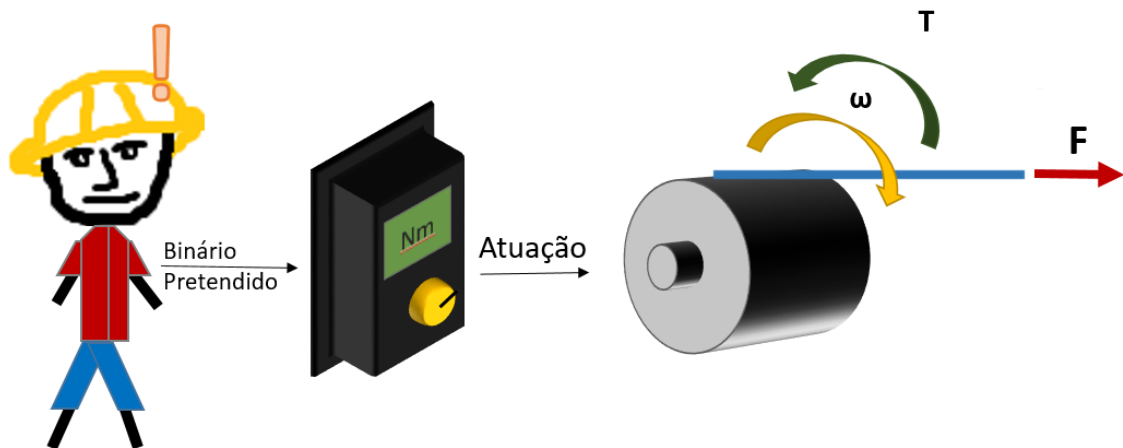


Figura 4 - Exemplo de controlo manual da tensão da fibra.

Esta solução está dependente da perícia e experiência do operador, estando sujeita a erros humanos. Por outro lado, a tensão não é constante, como se observa no gráfico da Figura 5, que retrata, sem unidades, a evolução dos parâmetros de binário e tensão ao longo de um processo manual.

Na Figura 6, está representado o mesmo controlo, mas com erros humanos, como demorar demasiado tempo num determinado patamar de binário, que pode originar roturas.

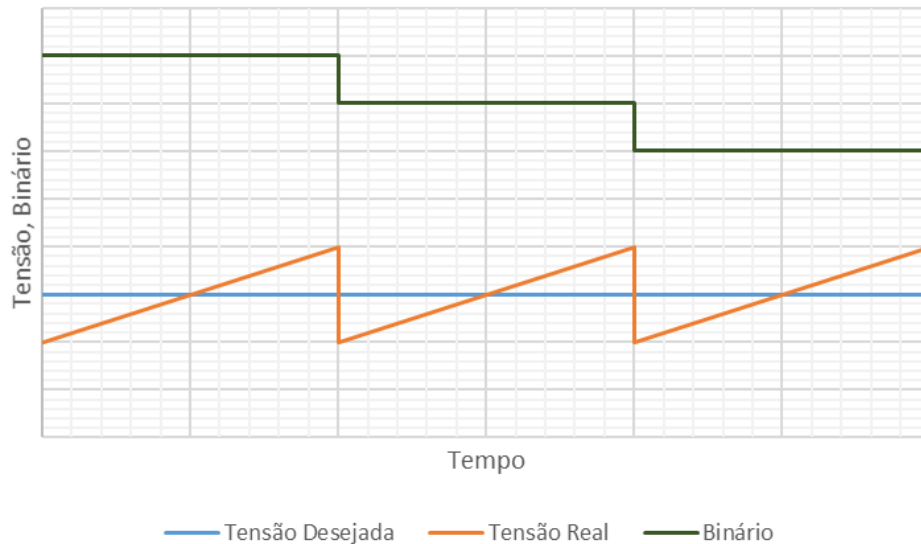


Figura 5 - Exemplo da evolução da tensão num processo de controlo manual.

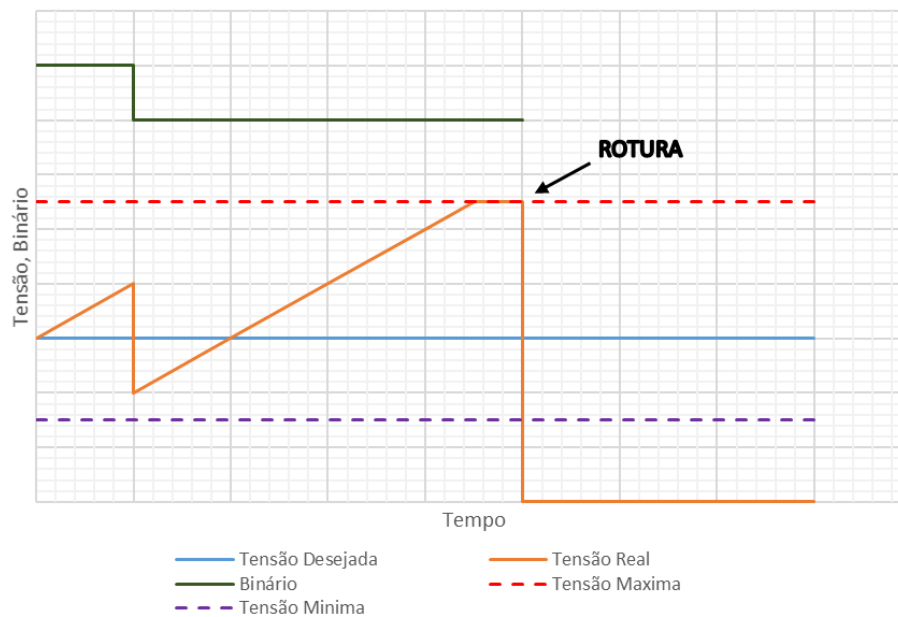


Figura 6 - Exemplo de um erro possível do controlo manual de tensão.

O controlo manual é uma solução económica em termos tecnológicos e eficaz em situações de menor rigor como, por exemplo, apenas evitar que a matéria prima se rompa e pare a produção. Não é praticável em controlos de maior exigência e necessita de um operário designado para manejar constantemente a máquina. Tal implica custos de mão de obra, num processo que, de outra forma, necessitaria de pouca supervisão.

Recorrendo a soluções mais automáticas, podemos utilizar, por exemplo, soluções em malha aberta.

A Figura 7 apresenta quatro soluções em malha aberta para controlo de tensão. Em geral, sendo conhecido o raio é conhecido o binário adequado para uma dada tensão pretendida. As quatro soluções são diferentes entre si no método de obter o raio.

As soluções *i)* e *ii)* utilizam o conhecimento da velocidade do rolo, no caso *i)* é dado pelo operador, que conhece o processo a jusante, no *ii)* a velocidade de rotação do desenrolador é conhecida através de um sensor de velocidade. Apesar de serem soluções simples de implementar, não se conhece o verdadeiro valor do raio do rolo, podendo levar a erros.

É possível utilizar sensores para medir o raio dos rolos e assim ajustar o binário do motor automaticamente. Pode-se recorrer a soluções que implicam contacto, como por exemplo um braço que acompanha o diâmetro do rolo, técnica *iv)* da figura, ou sem contacto, como o exemplo *iii)*, através de sensores ultrassónicos. Ambas as soluções permitem um controlo simples e barato. A solução *iv)* tem como desvantagem o material poder ser danificado pelo contacto e a existência de peças móveis sujeitas a desgaste que implica um menor tempo de vida e maior número de operações de manutenção. Na solução *iii)*, poderá ser induzido em erro por objetos estranhos entre o sensor e o material ou por desvios do rolo.

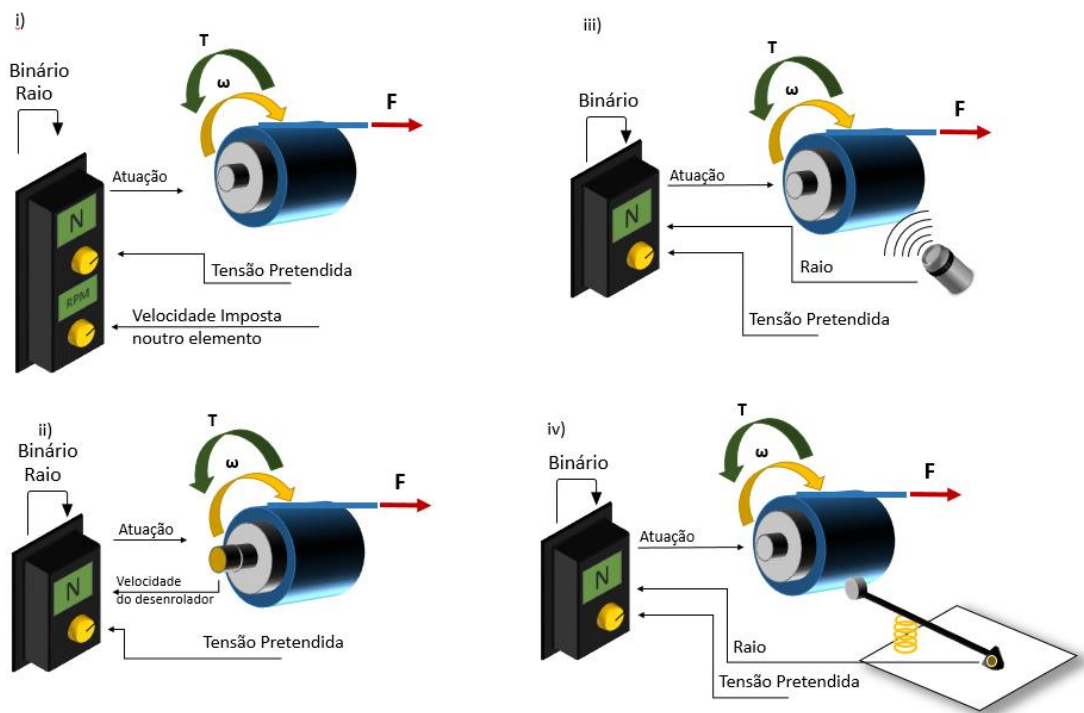


Figura 7 - Soluções de controlo em malha aberta.

Todas estas soluções podem ter problemas se o rolo não for cilíndrico. Por exemplo, se o rolo for oval, o raio depende não só do grau de utilização do rolo, se já foi desenrolado muito material dele ou não, mas também da posição de onde se está a retirar material.

É também necessário conhecer bem as dinâmicas do sistema e perturbações a que está sujeito para um controlo de maior exatidão. Ainda assim, o afastamento físico e processual das zonas, onde se pretende fazer controlo dos elementos que são atuados, irá, progressivamente, aumentar o erro a que o controlo está sujeito por acumulação de perturbações ou imprecisões de modelação. Por outro lado, é, ainda, necessário calibrar, regularmente, o funcionamento da máquina porque devido ao desgaste ou alterações na estrutura ou funcionamento na máquina induz erros na modelação que devem ser tomados em conta. Assim, as soluções em malha aberta são mais indicadas para controlar a tensão da fibra, apenas, no enrolamento ou desenrolamento, onde, normalmente, estão os elementos que impõe tensão à fibra e são possíveis de controlar.

Nalgumas circunstâncias, poderá ser mais adequado soluções em malha fechada. São, geralmente, mais caras e complexas de implementar, mas permitem o controlo da tensão em pontos específicos do processo, compensando os problemas conhecidos e caracterizáveis, como a variação do raio dos rolos, e as perturbações não conhecidas ou difíceis de modelar, como as perdas mecânicas ou viscosas, forças de atrito ou inerciais ou até perturbações externas ao funcionamento das máquinas, como a existência de objetos estranhos ao processo que o afetem.

Dentro das soluções em malha fechada existem dois grupos de maior destaque, aquelas que recorrem a *dancers* e aquelas que recorrem a células de carga. As células de carga medem diretamente a tensão dos materiais para enviar *feedback* do controlo efetuado para os autómatos, permitindo o sistema atuar sobre essa medição e respetivo erro em relação ao objetivo e fazer convergir esse erro para um valor o menor possível.

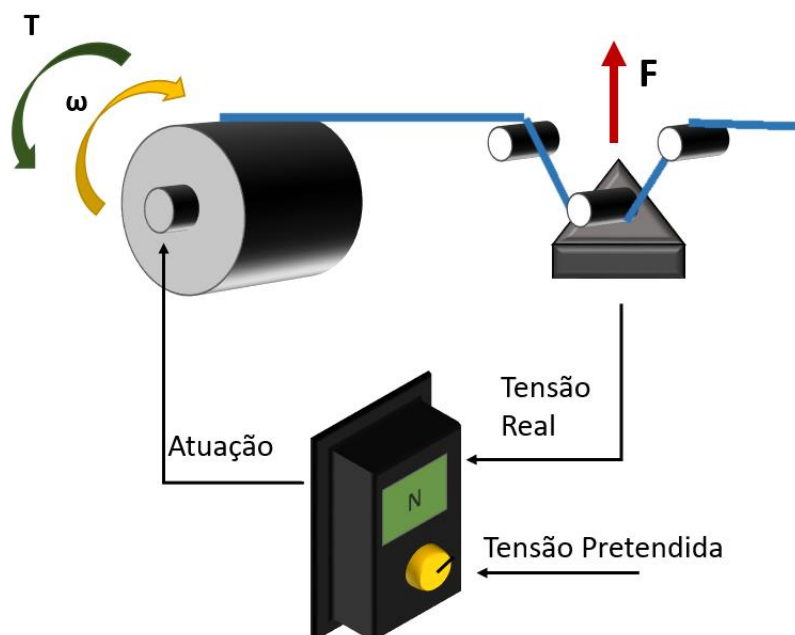


Figura 8 - Ilustração do controlo em malha fechada que recorre a células de carga.

As células de carga são soluções compactas, disponíveis no mercado em várias formas que permitem uma implementação simples em quase qualquer tipo de situação, sem necessidade de muitas alterações do sistema. Células de carga de maior precisão, ou para implementar com

formatos mais específicos, podem aumentar o custo das mesmas, mas são, geralmente, opções de baixo custo.

Os *dancers*, por sua vez, são atuados de uma dada forma que corresponderá à tensão desejada de controlo. Um sensor de posição irá medir a posição do *dancer* e, enquanto ele estiver entre as suas posições extremas, a tensão do material será constante e igual à pretendida. Os motores serão controlados para alimentar mais ou menos material, por exemplo em velocidade ou binário, de forma a que a posição do *dancer* seja mantida entre essas posições válidas.

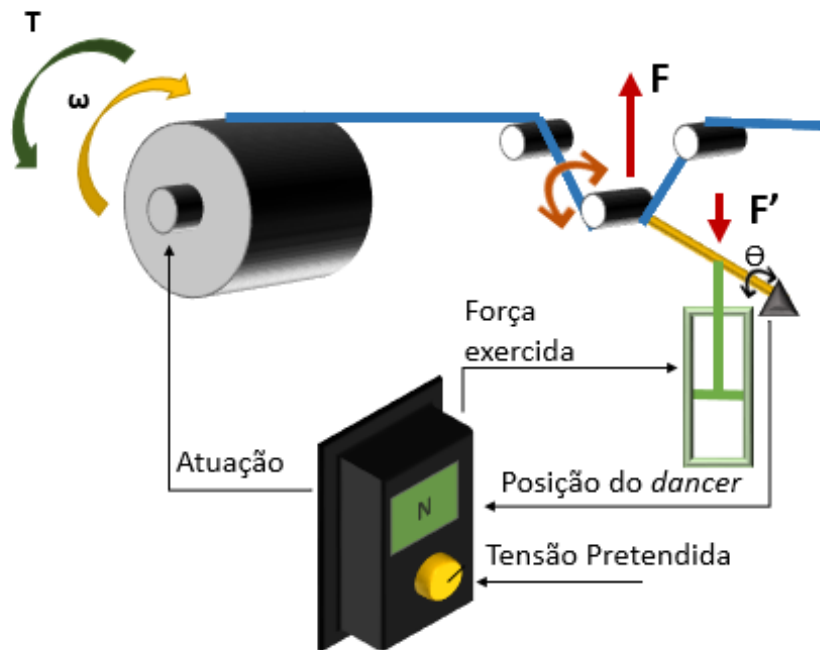


Figura 9 - Exemplo de controlo de tensão em malha fechada com utilização de dancer.

Os *dancers* têm como principal vantagem o facto de armazenarem material, importante para absorver flutuações de tensão. Estas podem ocorrer devido a irregularidades do rolo que alimenta material ou quando a direção de desenrolamento muda.

As soluções com células de carga têm dificuldades em corrigir este tipo de problemas, mas os *dancers* revelam desvantagens no atravancamento, ocupando muito mais espaço, e problemas de inércia e atrito, o que obriga a maiores cuidados com a massa dos elementos e contacto entre peças móveis [15].

Estas são as opções encontradas no mercado para o controlo de tensão, sendo, agora, necessário saber as circunstâncias em que vai ser implementado o controlo de tensão.

3. Máquina de Pré-Impregnação

A máquina em que vai ser implementado o sistema de controlo de tensão, da Century Design, já sofreu algumas adaptações ao longo dos últimos anos.

Numa descrição simples do seu funcionamento, a fibra é desenrolada de um tensionador, impregnada numa resina, percorre um conjunto de rolos e enrola num tambor para formar um laminado, quando o cilindro produzido à volta do cilindro for cortado, transversalmente.

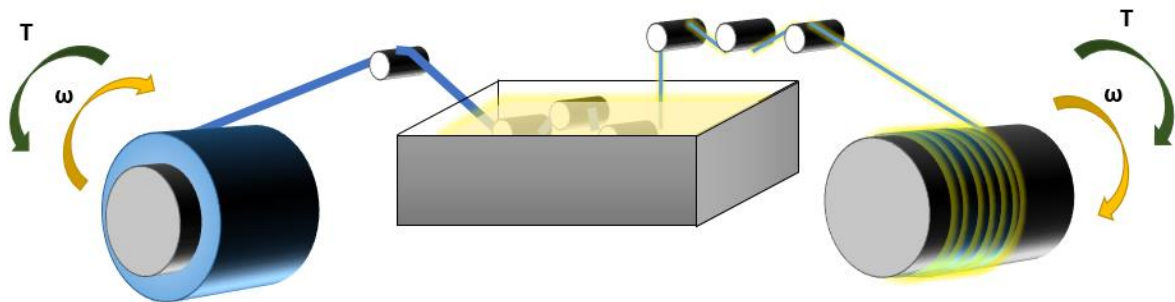


Figura 10 - Ilustração do processo de pré-impregnação.

Esta máquina permite fabricar pré-impregnados unidirecionais. É possível configurar o funcionamento da mesma através de ecrãs táteis. Junto ao enrolador é possível selecionar a velocidade de rotação do tambor onde o impregnado enrola, o passo, a distância entre duas fibras paralelas, e a direção do passo, se enrola da direita para esquerda ou o contrário. É possível definir a tensão de fibra desejada no alimentador.

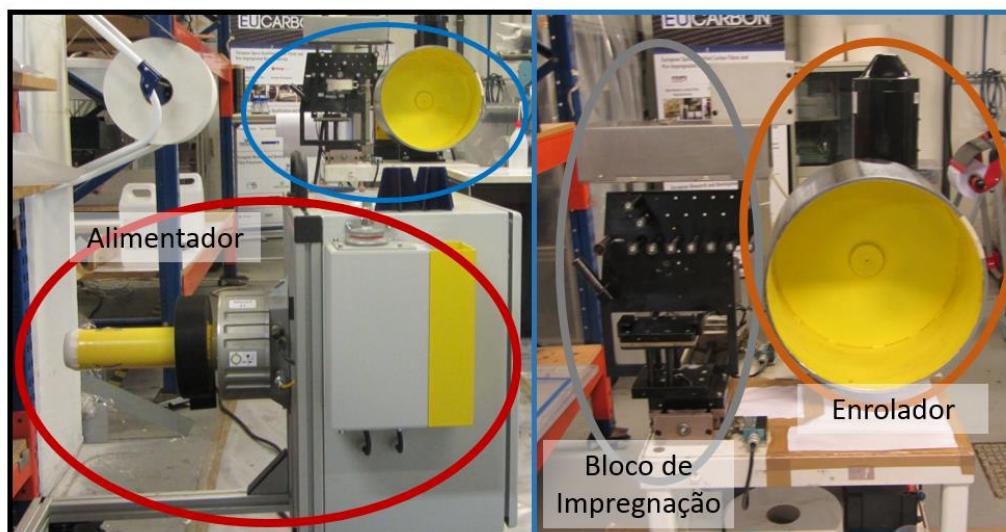


Figura 11 - Fotografia da máquina de pré-impregnação com identificação dos blocos operacionais.

No sentido de controlar certos parâmetros de funcionamento foi acrescentado controlo de temperatura do banho de resina, controlo da espessura de filme após impregnação e alteração dos rolos para diminuir o atrito.

Assim a máquina pode ser dividida em três blocos operacionais, o enrolador, o alimentador e o bloco de impregnação, identificados na Figura 11.

É ainda possível analisar o controlo e comunicação entre componentes da máquina, que será denominado “bloco de controlo” e que inclui os autómatos, elementos de segurança e restantes controladores.

De seguida serão analisados estes 3 blocos operacionais e o respetivo controlo.

3.1. Enrolador

O bloco enrolador é onde o pré-impregnado é colocado para formar o laminado. As fibras impregnadas enrolam, devidamente espaçadas, num tambor de forma cilíndrica, formando também um cilindro. O cilindro de pré-impregnado é, no final do processo, cortado, ficando com a forma de um laminado retangular.

O tambor, o elemento 3 da Figura 12, é acionado, através de um redutor, elemento 2, por um motor de indução trifásico, elemento 1, que é por sua vez comandado por um variador de frequência, através do cabo 4.



#	Identificação
1	Motor de Indução Trifásico
2	Redutor
3	Tambor de Enrolamento
4	Cabo de Ligação ao VFD

Figura 12 - Fotografia do bloco Enrolador da máquina de pré-impregnação.

O tambor é um cilindro de 450 mm de diâmetro por 300 mm de largura. O motor é um motor de indução trifásico, da Marathon Electric, de 2 pares de polos, modelo 56H17T5301B, de potência nominal 370 W e binário nominal de 2,06 Nm [18]. A seguinte imagem é a placa do motor.

MARATHON ELECTRIC BLACK MAX					
MODEL #	LVA 56H17T5301B P	FRAME	56C		
POLES	4	ENC. TENV	CODE L	DES B	TYPE TS
VOLTS	230/460	FL	1735	FL	1.6/8
SF	1.0	DUTY CONT.		AMPS	
SERIAL		MAX. AMB. °C	40	NL	
MAX. SAFE RPM	5400	S.E. BRG.	6203	O.S.E. BRG.	6203
				AMPS	.52
				ROTOR	WK 2 .056
HZ	HP	RPM	TORQUE	VOLTS	AMPS
2	0	0	1.52	0	.75
60	.5	1735	1.52	460	.8
120	.5	3510	.75	460	.8
		R1	R2	X1	X2
OHMS/PHASE	22.3	17.0	24.1	18.2	533.0
CAT NO-Y534					
3 PHASE INVERTER DUTY AC INDUCTION MOTOR					
MFG. BY MARATHON ELECTRIC MANUFACTURING CO. WAUSAU, WI. MADE IN USA					

Figura 13 - Placa das características do motor de indução trifásico do enrolador de pré-impregnado.

O motor é alimentado a corrente trifásica de frequência variável por um Variador de Frequência da Yaskawa, modelo CIMR-VU2A0006FAA. Este variador é alimentado a corrente alternada monofásica, e pode controlar o motor em modo escalar V/f ou em modo vetorial em malha aberta.

O veio do motor está ligado a um redutor do tipo parafuso sem-fim, de razão de transmissão 1:50, da Cone Drive, modelo B0610650.KAATA, da série B, com um rendimento de 66% [19].

O tambor pode ser comandado para rodar até 30 rpm. Assim, o motor, poderá rodar até 1500 rpm, após uma redução de 1:50. Contudo, o tambor é utilizado, apenas, no máximo, até 3 rpm, ou 150 rpm no veio do motor, por ser a velocidade máxima para a qual se obtém uma impregnação minimamente satisfatória.

A tensão máxima da fibra é de 100 N, assim sendo o binário será dado por:

$$T_{t,max} = F \times r_t = 100 \times \frac{0,450}{2} = 22,5 \text{ Nm}$$

Assim a potência de funcionamento máxima em regime permanente será:

$$P_{tambor} = T_{tambor} \times w_{tambor} = 22,5 \times \frac{3 \times 2 \times \pi}{60} = 7,07 \text{ W}$$

Considerando, o rendimento de 66% do redutor então:

$$P_{motor} = \frac{7,07}{0,66} = 10,71 \text{ W}$$

Relembrando que a potência nominal do motor é de 370 W, verifica-se, por estes cálculos, que o motor está sobredimensionado para a aplicação.

Outro valor de referência importante a ter em conta é a velocidade linear máxima do pré-impregnado no enrolador:

$$v_l = \frac{w \times 2\pi}{60} \times r = \frac{3 \times 2\pi}{60} \times \frac{0,450}{2} = 70,7 \text{ mm/s}$$

De seguida, serão apresentados conceitos teóricos para, depois, avaliar o funcionamento do bloco enrolador.

3.1.1. Motor de Indução Trifásico

Os motores de indução trifásicos são máquinas relativamente baratas, robustas, de construção simples, rendimento elevado e que necessitam de pouca manutenção. Devido a estas características são uma escolha popular nas mais diversas indústrias.

Os motores são compostos por um rotor e um estator. Neste tipo de motores, o estator é composto por enrolamentos desfasados espacialmente que, quando alimentados por cada uma das fases da corrente trifásica alternada, formam um campo magnético girante.

O campo girante cria uma força eletromotriz no rotor, curto circuitado ou em gaiola de esquilo, que implica a existência de corrente induzida.

Ora, esta corrente gera, por sua vez, um campo magnético no rotor, que tenderá a seguir o movimento do campo girante [20].

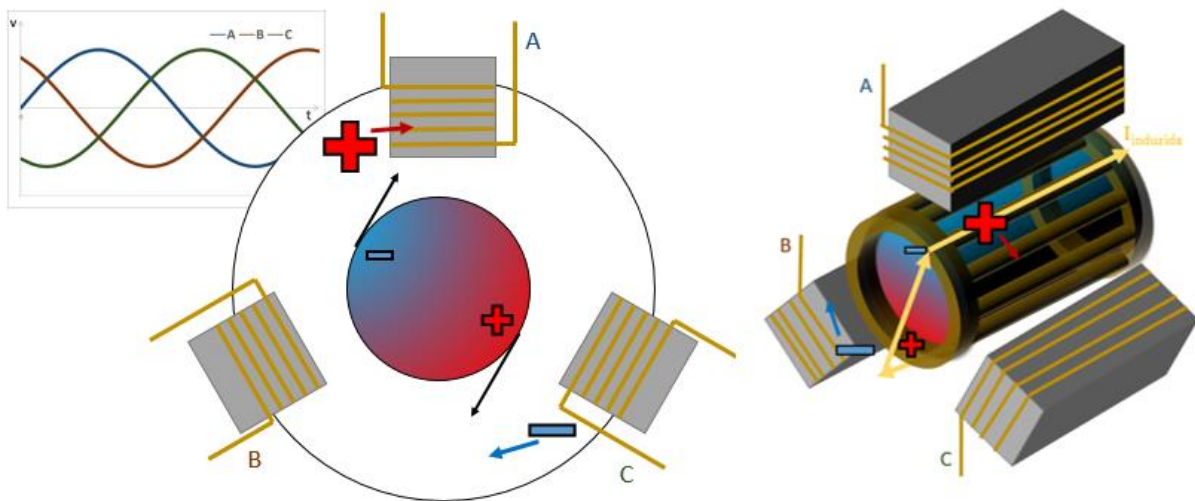


Figura 14 - Ilustração do funcionamento de um motor de indução trifásico.

O rotor irá rodar a uma velocidade diferente do campo girante, sendo necessário introduzir dois conceitos importantes: a velocidade de sincronismo, que é a velocidade de rotação do campo

girante, e o escorregamento, que é a diferença relativa da velocidade do rotor e da velocidade de sincronismo.

As seguintes expressões oferecem o valor numérico dessas grandezas, respetivamente,

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Sendo que f corresponde à frequência da rede alimentada ao motor em hertz, e p o número de pólos por fase. Assim n_s é obtido em rpm. Na segunda expressão, n corresponde à velocidade do rotor do motor.

Por outro lado, o binário produzido pelo motor é diretamente proporcional ao fluxo, ϕ , intensidade da corrente induzida no rotor, I_2 , e o factor de potência do rotor, $\cos(\theta_2)$ [21], [22], como reflete a seguinte relação:

$$T \propto I_2 \times \phi \times \cos(\theta_2)$$

Ora, o fator de potência e a intensidade de corrente induzida são função do escorregamento, assim sendo o binário será função do escorregamento [21], [22].

A curva binário-velocidade tem a forma genérica da curva da Figura 15. Destaca-se o ponto de funcionamento nominal, ω_n , e vizinhança onde a variação pode ser considerada aproximadamente linear. A variação de velocidade com a variação de binário é relativamente baixa nesta zona de funcionamento.

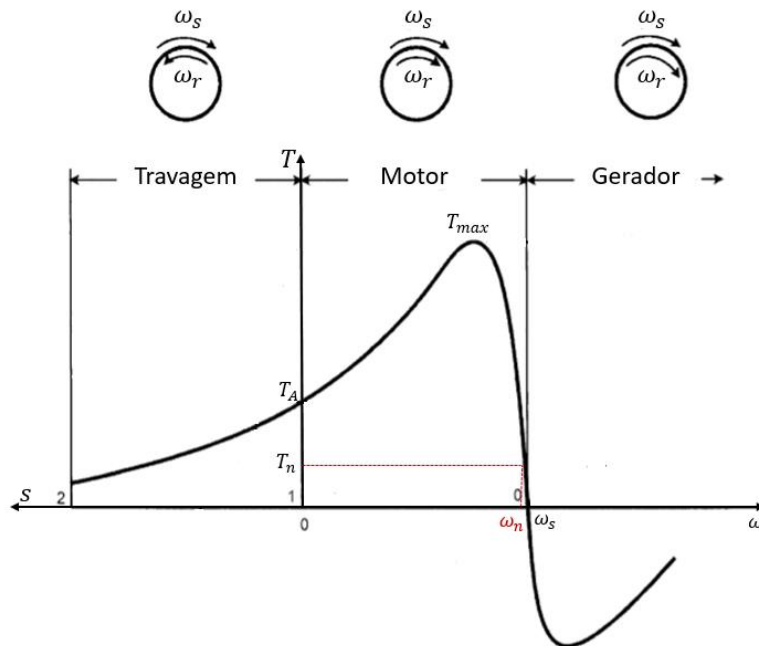


Figura 15 - Curva velocidade-binário característica genérica de um motor de indução trifásico. Figura adaptada de [21].

Relembrando, o binário é função do fluxo no entreferro, que por sua vez é proporcional à tensão no rotor e, conseqüentemente, proporcional à tensão no estator e inversamente proporcional à velocidade do campo girante, [21], [22]:

$$\varphi \propto V_r \propto \frac{V_e}{f}$$

Assim, pode-se admitir que, se o fluxo no entreferro e o fator de potência forem constantes, então o binário será função linear da intensidade de corrente.

Por outras palavras, a intensidade de corrente necessária para o motor suportar um dado binário resistivo será função linear desse binário, se o fluxo entreferro e o fator de potência forem mantidos constantes. Isto permite, conhecendo outros parâmetros de funcionamento, estimar o binário com base na intensidade de corrente consumida pelo motor.

Contudo, voltando à velocidade síncrona do motor, esta é só função da frequência da corrente alternada trifásica que alimenta o estator. É neste princípio que se baseiam os variadores de frequência. No seguinte subcapítulo, será feita uma apresentação sumário dos variadores de frequência.

3.1.2. Variador de Frequência

Os variadores de frequência são os controladores habituais dos motores de indução trifásicos.

Geralmente, os variadores de frequência são alimentados a corrente alternada monofásica ou trifásica. De forma simplificada, um retificador, que consiste, em pontes de díodos e um filtro passa baixo, sob a forma de um condensador, converte a corrente alternada em corrente contínua de tensão constante. No inversor, essa corrente contínua é transformada em alternada pela comutação dos transístores, feita eletronicamente, que envia um sinal binário em Modulação por Largura de Impulso (PWM) para o motor. O motor, por causa da frequência dos pulsos ser muito elevada em comparação com a sua dinâmica, compreende o sinal como um sinal analógico sinusoidal. [23], [24].

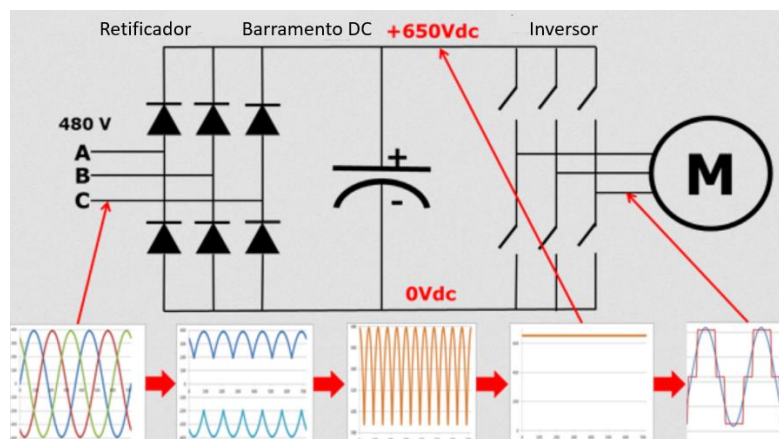


Figura 16 - Ilustração do funcionamento de um variador de frequência genérico. Imagem adaptada de [23].

A velocidade síncrona do motor será a velocidade correspondente à frequência da corrente alternada a que é alimentado o motor. O método de controlar a alimentação do motor varia com os objetivos pretendidos e com os respetivos requisitos.

O controlo pode ser de um de dois grandes tipos, controlo escalar e controlo vetorial.

O controlo escalar tem esse nome por ser variado apenas o valor absoluto das variáveis de entrada, no caso particular do V/f varia-se apenas o valor escalar da tensão e da frequência. É um tipo de controlo muito utilizado, devido à sua simplicidade e facilidade de implementação, apesar de desempenho inferior ao controlo vetorial.

Essa menor qualidade de controlo dá-se porque várias grandezas são dependentes entre si. Por exemplo, pode ser pretendido controlar o fluxo no entreferro alterando a tensão e controlar o binário alterando a frequência. Contudo o binário também é função da tensão e o fluxo função da frequência, pelo que o controlo de ambas, independentemente, não é possível. Assim o controlo não é tão eficiente e é mais lento a reagir, podendo, em certas situações, até levar à instabilidade do sistema, por causa funções de transferência mais complexas e com mais dinâmicas em jogo.

Como foi referido no final da secção 3.1.1, o binário é diretamente proporcional ao fluxo no entreferro. Se a relação V/f for mantida constante, o fluxo no entreferro, que é função dessa razão, vai-se manter constante. Ou seja, podemos variar a velocidade síncrona e consequentemente a velocidade de funcionamento do motor sem variar o binário nominal disponível pelo motor.

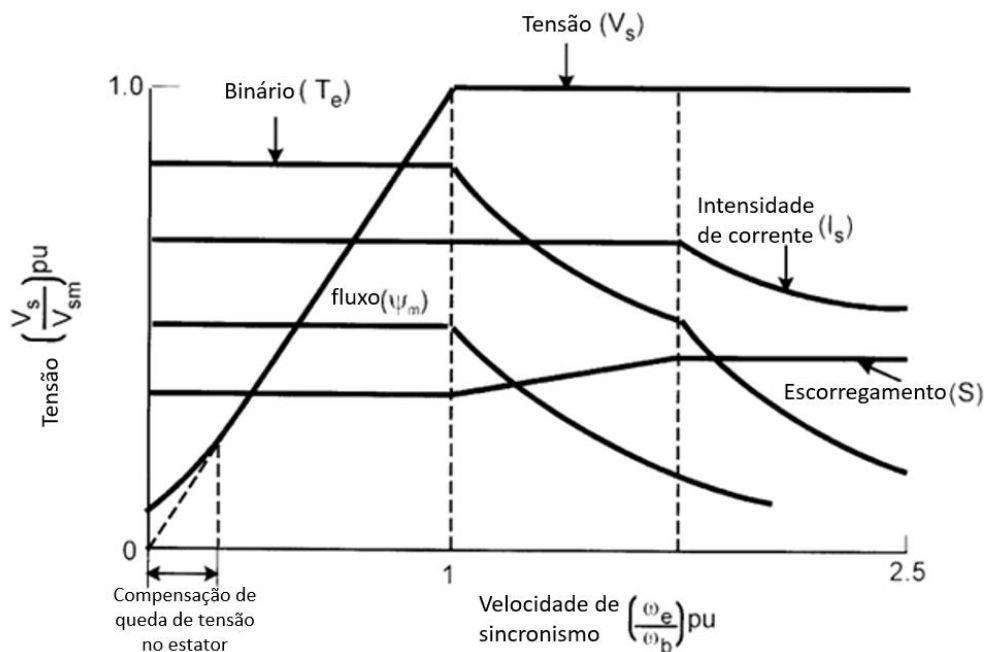


Figura 17 - Variação de alguns parâmetros funcionais de um motor de indução trifásico em controlo escalar V/f, com a variação da frequência de alimentação. Imagem adaptada de [21].

Contudo, não é possível manter essa relação indefinidamente. A partir de uma certa velocidade de funcionamento que corresponderia a um valor de tensão superior à tensão de alimentação, deixa de ser possível V/f ser constante. Já que não é possível ter valores de tensão superiores à tensão de alimentação. A partir desse ponto de funcionamento, o variador de frequência passará a funcionar sempre à mesma tensão e a potência será também constante, diminuindo, assim, o binário disponível por uma relação $T \times \omega$ constante. Apesar do fluxo diminuir, a intensidade de corrente mantém-se devido a um aumento do escorregamento.

Existe ainda uma terceira zona onde $T \times \omega^2$ é constante porque o escorregamento volta a ser constante e a intensidade de corrente começa a diminuir juntamente com o fluxo entreferro [21].

A Figura 17 representa a evolução dos vários parâmetros de funcionamento referidos.

O controlo vetorial consiste na variação não só da magnitude, mas também do ângulo de fase das grandezas, e encontra-se em crescimento face ao controlo escalar, devido às melhores propriedades dinâmicas, análogas aos de motores DC. Em motores DC, pode ser possível controlar independentemente a intensidade de corrente no estator e no rotor. Isto significa que se pode considerar uma intensidade relacionada com o fluxo e outra com o binário, controlando, assim, diretamente, estas duas grandezas importantes para o funcionamento do motor, independentemente uma da outra.

Ora, nos motores assíncronos de corrente alternada com controlo vetorial, é possível desacoplar a intensidade de corrente do estator em duas componentes ortogonais. Estas podem ser controladas independentemente uma da outra. Assim é possível, por exemplo, alterar o fluxo sem alterar o binário e vice-versa [21], [25]. Para este tipo de controlo, é necessário conhecimento da velocidade do motor. Em controlo vetorial em malha fechada, a velocidade de rotação do fluxo é conhecida com recurso a transdutores, no caso de controlo vetorial em malha aberta, essa velocidade tem de ser estimada recorrendo a outros parâmetros, como a tensão e intensidade de corrente nos terminais do motor. Isto implica um controlo mais barato de implementar do que em malha fechada, mas com menor performance, por não ser conhecida a verdadeira posição do fluxo, e dificuldades acrescidas no controlo a velocidades muito reduzidas [21].

3.2. Alimentador

O alimentador de fibra é constituído por um tensionador EGA, da Texmer GmbH, visível na Figura 18, e teve um custo de 12 000 €. Consiste num servomotor muito compacto que controla o seu próprio binário. Este equipamento tem um funcionamento completamente independente da restante máquina de pré-impregnação e impõe tensão à fibra no desenrolamento.

A informação acerca deste produto é escassa, por ser tecnologia relativamente avançada. Assim sendo, o seu funcionamento interno não é completamente conhecido, contudo, uma possibilidade é ocorrer o controlo da corrente do motor para controlar indiretamente o binário. Este equipamento possui uma HMI em que se pode configurar a velocidade de desenrolamento, em metros de fibra por minuto, informação geral das bobinas de fibra, como o diâmetro, e a tensão desejada. Assim, o autómato do desenrolador possui conhecimento da velocidade do motor, velocidade linear da fibra e diâmetro inicial da bobina, calculando o seu diâmetro para cada momento, ajustando o binário correspondente à tensão desejada.



Figura 18 - Desenrolador com rolo de fibra de carbono.

Não se é pretendido alterar qualquer funcionamento deste desenrolador, assim é desejado criar um sistema idêntico para uso simultâneo ou alternativo. Assim o desenrolador desenvolvido terá de possuir controlo de tensão da fibra a desenrolar, de preferência, de forma independente da máquina de pré-impregnação.

3.3. Bloco de Impregnação

No bloco de impregnação, a fibra percorre um conjunto de rolos e, entretanto, mergulha na resina sendo impregnada na matriz de material polimérico.

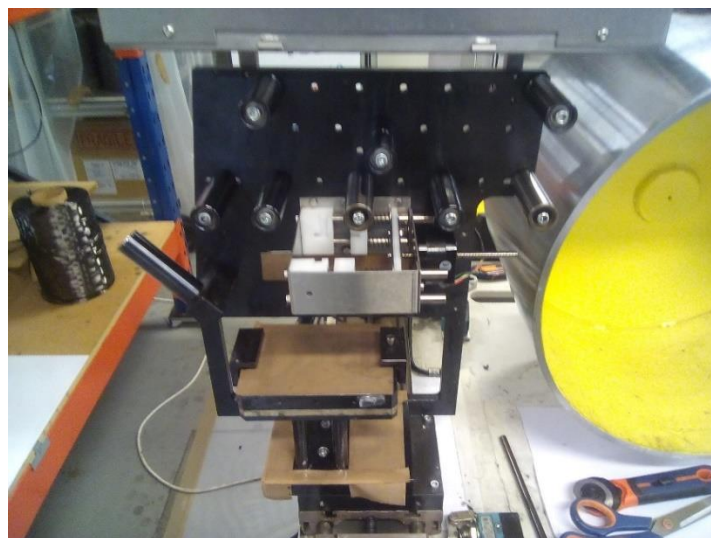


Figura 19 - Fotografia do bloco de impregnação.

Os rolos são do tipo *cantilever*, isto é, com uma extremidade do seu veio encastrada e a outra livre, e são cilíndricos com 25 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. Cada rolo possui rolamentos de esferas 626-Z, de 6 mm de diâmetro interior, que rodam em parafusos de rosca métrica e cabeça de oco hexagonal, que têm a função de veio. O desgaste do uso, num ambiente sujeito a muitas contaminações como pó ou resina, aumenta efeitos de atrito e, assim, os rolos aumentam a tensão das fibras e o dano causado nas mesmas. Um elevado número de rolos é, contudo, importante para diminuir o excesso de resina no pré-impregnado e garantir que a fibra não enrola torcida.

No banho de resina, a viscosidade do fluido, relacionada com a força opositora ao movimento da fibra, estará dependente da resina utilizada, da temperatura do banho e da própria fibra.

As forças resistivas de atrito e viscosas são as perturbações de maior importância para a alteração do estado de tensão da fibra ao longo do processo de pré-impregnação. Não são constantes para diferentes situações e contextos e assim difíceis de medir ou estimar. Assim sendo, não é adequado prever a tensão do pré-impregnado junto ao enrolador ou no banho de resina com base na tensão da fibra junto ao alimentador.

A impregnação da fibra ocorre num carro que se move transversalmente ao tambor, e controla a distância entre fibras no enrolamento e pré-impregnado produzido.

O movimento transversal é acionado por um servomotor da Yaskawa, modelo SGMJV-02A3A61, comandado por um driver do mesmo fornecedor modelo SGD7-2R1F01A. O movimento rotacional do motor é transmitido por um acoplador elástico, para absorver alguma torção e flexão e não danificar o motor, para um parafuso. O parafuso enrosca no carro transversal, que possui guiamento numa calha, e assim, o carro move-se linearmente. A velocidade do movimento transversal é proporcional à velocidade de rotação do tambor de enrolamento. Sendo a constante de proporcionalidade o passo.

A largura do laminado produzido é controlado manual ou automaticamente, mas é restringido por dois fins de curso que correspondem aos limites do tambor de enrolamento.

É neste bloco que ocorre a impregnação das fibras e que grande parte das grandezas e parâmetros que podem influenciar a qualidade do pré-impregnado podem e devem ser controladas ou monitorizadas ao longo do processo. É, atualmente, possível controlar a temperatura da fibra antes do banho através de resistências com medição da temperatura por um Pt100.

3.4. Bloco de Controlo

Os blocos Enrolador e Bloco de Impregnação podem ser analisados separadamente, mas não podem ser considerados independentes, sendo necessário um bloco que sincronize o correto funcionamento de todos os outros. O controlo do alimentador é, por sua vez, independente dos outros dois e não é incluída comunicação de dados ou parâmetros de funcionamento entre ele e os restantes blocos.

Além de vários componentes de segurança, como fusíveis, o bloco de controlo inclui os drivers dos motores de enrolamento e do movimento transversal, o autómato e o meio de

comunicação com o operador, uma HMI. Na Figura 20, vêem-se os elementos do bloco de controlo no interior do quadro elétrico da máquina.

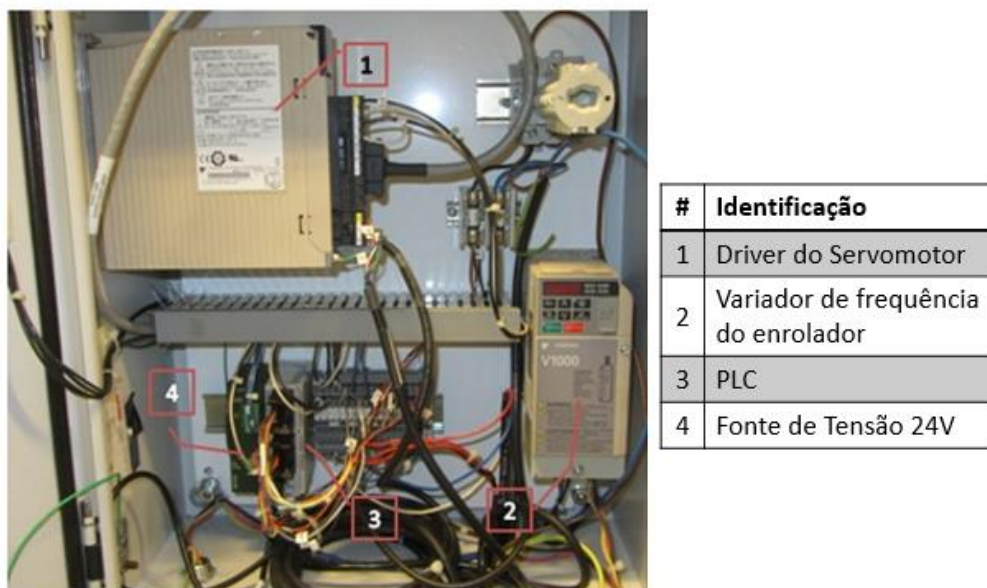


Figura 20 - Fotografia da caixa elétrica da máquina com respetiva legenda.

O autómato é um PLC da Panasonic modelo FPG-C32T2H. A HMI é do mesmo fornecedor, modelo AIG12GQ12D. A HMI permite ao operador alterar a velocidade de rotação do enrolador, fortemente associada à velocidade de produção do pré-impregnado, sentido de movimentação do carro do bloco de impregnação, o passo e largura de pré-impregnado que se pretende.

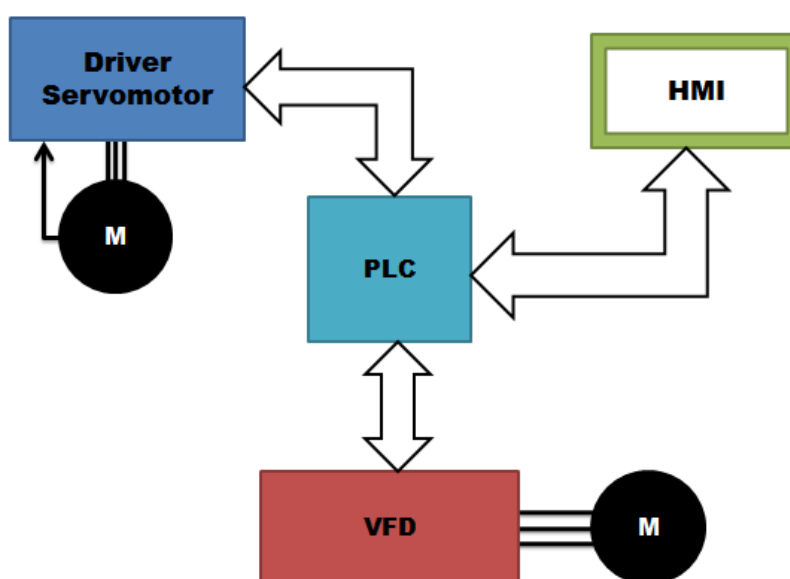


Figura 21 - Diagrama de comunicações entre componentes responsáveis pelo controlo da máquina.

O diagrama da Figura 21 retrata a troca de informações no bloco de controlo. O operador configura os parâmetros pretendidos numa HMI, que se liga, por comunicação RS-232, ao PLC. Este autómato liga-se por portas digitais aos drivers de cada um dos motores. Os drivers alimentam a corrente alternada adequada aos motores e, no caso do servomotor, recebe *feedback* do mesmo.

Não existe *feedback* de velocidade do motor de enrolamento, nem o “VFD”, variador de frequência do motor do enrolamento, envia dados para o PLC, assim sendo conclui-se que velocidade de enrolamento é em malha aberta. Assim sendo, o PLC não tem conhecimento da real velocidade de enrolamento. Se for modificado o controlo de motor de enrolamento, o sistema terá de ser também adaptado para que o passo e a razão de velocidade dos dois motores permaneçam constantes.

Para efeitos de diferenciação, o variador de frequência do motor do movimento transversal chama-se “Driver do Servomotor” e liga-se ao respetivo motor por dois cabos. Um deles são as três fases da corrente trifásica a que o servomotor funciona, e o outro é o *feedback* do servomotor para controlo em malha fechada da sua velocidade. Ambos os variadores de frequência são alimentados a corrente monofásica.

Ao PLC estão ainda ligados os fins de curso do carro do bloco de impregnação, que dão indicação de quando a máquina deve deixar de funcionar.

Os seguintes subcapítulos irão aprofundar a comunicação entre os elementos de cada um dos componentes do bloco de controlo e programação de cada uma das componentes.

3.4.1. Comunicação HMI – PLC

O PLC e a HMI comunicam entre si através de protocolo RS232. Para testar esta comunicação e estudar a viabilidade de reprogramar o PLC para a função pretendida de controlo de tensão foram feitas várias abordagens: ligar o PLC diretamente a um computador, ligar a HMI diretamente a um computador e intercetando a comunicação entre os dois.

Não foi possível comunicar através de computador com nenhuma dos componentes, mesmo utilizando o software adequado dos fornecedores. Numa tentativa de interromper a comunicação em RS232 verificou-se que o programa que o PLC corre é comunicado da HMI sempre que se prime o botão “Start” da interface gráfica. Só é possível aceder à interface se a HMI estiver diretamente ligada ao PLC, não permitindo qualquer operação de ambos se a ligação for interrompida em qualquer momento de funcionamento, antes de ligar a máquina, durante o arranque da interface gráfica, durante o seu funcionamento com os motores parados ou durante o funcionamento dos motores.

Estas limitações não permitem um acesso claro à programação do PLC e da HMI. Assim sendo não se achou adequado tentar alterar o seu funcionamento.

3.4.2. Comunicação PLC – Drivers

Apesar das limitações anteriores, foi feito um trabalho de investigação da comunicação do PLC com os *drivers* que ele controla, nomeadamente, o “Driver do Servomotor” e o “VFD”. O PLC controla a velocidade desejada dos dois motores e, como já foi visto no início desta secção, ambos os drivers estão ligados ao PLC por portas de leitura de modulação de impulsos.

Este PLC só tem capacidade de enviar sinais digitais, isto é, as portas de comunicação ou dão o valor 1 ou 0, não sendo possível enviar um sinal analógico. Normalmente, os drivers, para terem conhecimento da velocidade pretendida para os motores que controlam, precisam de um sinal analógico ou em alternativa um sinal de impulsos.

Um sinal através de impulsos pode ser de vários tipos, como PWM, ou, neste caso, em frequência. O PLC envia um sinal de frequência que é função linear da velocidade pretendida.

Primeiro, foi analisado o funcionamento do sinal enviado para o variador de frequência do motor do enrolador para retirar a função que relaciona a frequência do sinal enviado com a velocidade pretendida.

O variador de frequência está programado para funcionar com uma característica linear, com valor máximo de velocidade, 30 rpm, a 28 kHz, o que faz prever uma função:

$$f_{e,teórica}(n) = \frac{28000}{30} n = 933,33 n$$

Com f_e , frequência de sinal para comando do motor do enrolador, em Hz e n em rotações por minuto.

Foi medido, com um multímetro Keithley, a frequência do sinal para várias velocidades configuradas na HMI, obtendo-se os resultados no gráfico da Figura 22.

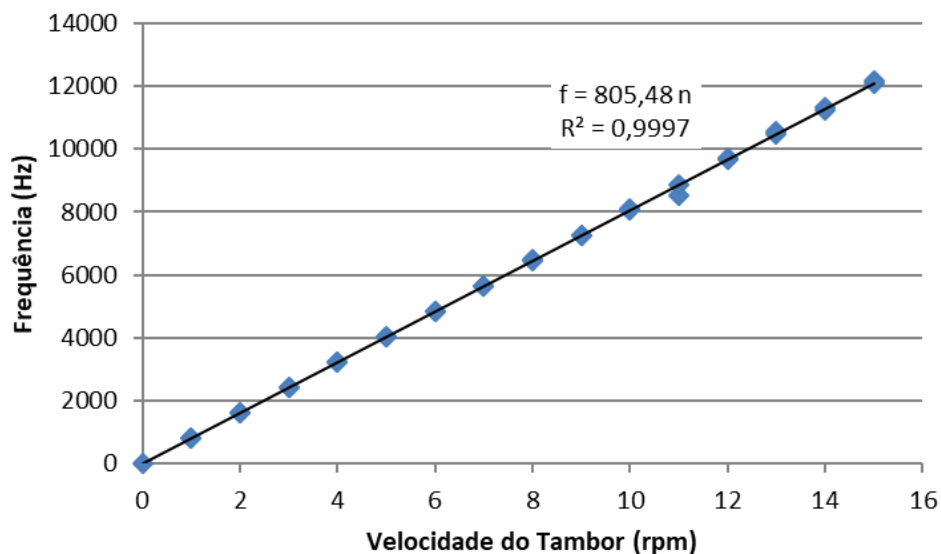


Figura 22 - Gráfico da velocidade pedida para o tambor-frequência do sinal enviado do PLC para o variador de frequência do motor do enrolador.

Fazendo uma regressão linear, obteve-se a seguinte função:

$$f_{e,real}(n) = 805,48 n$$

Observa-se que a função real é diferente da função prevista pela configuração do “VFD”.

Como a velocidade linear do servomotor é função do passo e da velocidade de enrolamento, a frequência do sinal de comando para o “Driver do Servomotor” é por sua vez função do passo e da velocidade do enrolador que deverá ter a forma

$$f_s(w, p) = K \times n \times p$$

Com f_s , a frequência de sinal para comando do servomotor do movimento transversal do carro, do bloco de impregnação, em Hz, n em rpm e p , de passo, em mm/rotação. K é uma constante, função da configuração do “Driver do Servomotor”, que não é acessível devido ao painel de controlo manual estar lacrado.

Foram realizadas medições da frequência de comando com o mesmo multímetro Keithley para diferentes valores de passo e de velocidade de rotação do tambor do enrolador, obtendo-se o gráfico da Figura 23.

Das regressões lineares, que se retiram dos dados anteriores, é possível retirar um gráfico dos coeficientes de multiplicação função do passo selecionado, visível na Figura 24.

Assim sendo:

$$f_s(n, p) = 2681,9 \times n \times p$$

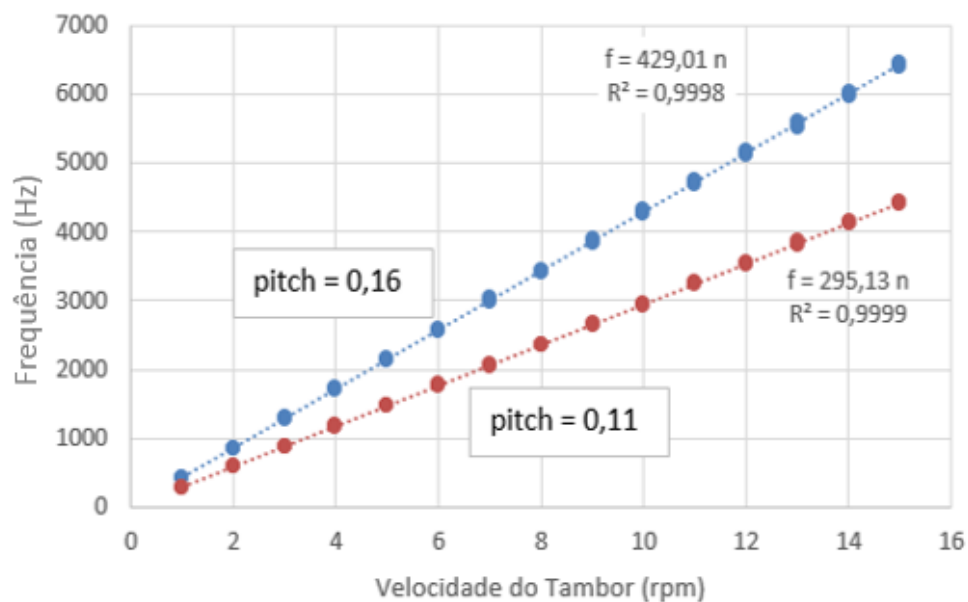


Figura 23 - Gráfico da frequência enviado para o driver do servomotor para dois valores diferentes de passo.

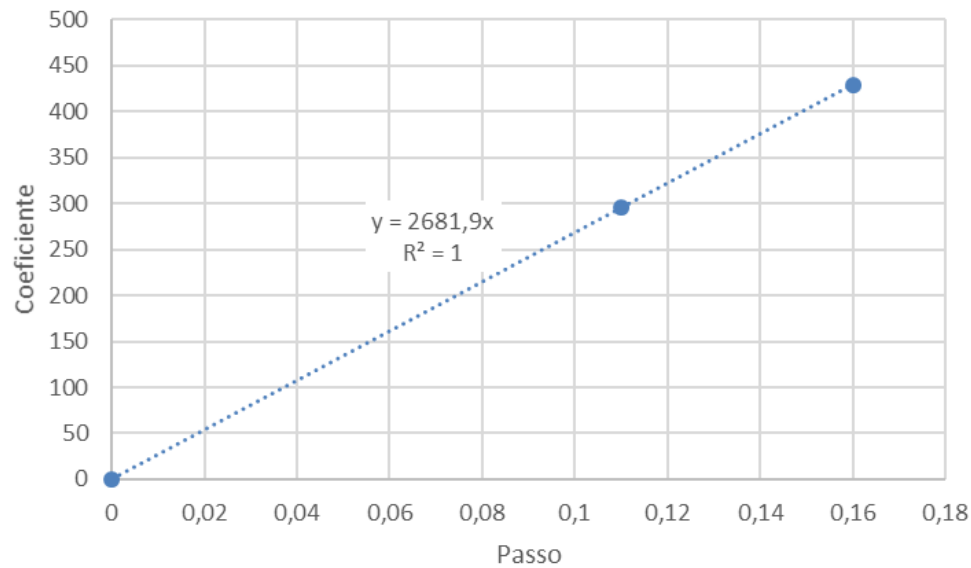


Figura 24 - Gráfico coeficiente função do passo configurado.

Fazendo uma transformação simples da função anterior e sabendo que a velocidade linear é v , é possível obter a frequência função da velocidade linear pretendida, segundo a Figura 25.

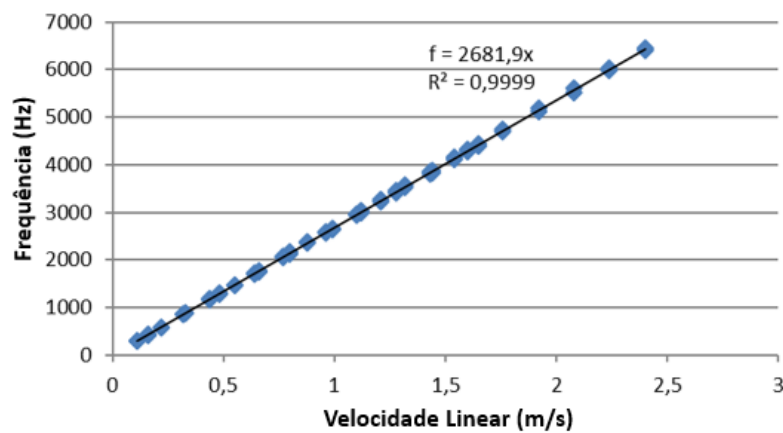


Figura 25 - Frequência do sinal enviado pelo PLC, função da velocidade linear necessária para o servomotor respeitar um dado passo.

Estas equações permitem o controlo dos motores sem ter de recorrer ao PLC, servindo de base para uma reprogramação no futuro deste PLC ou de outro sistema que substitua o atual.

A ligação das referências de velocidade é a única ligação do PLC ao “VFD”, contudo o “Driver do Servomotor” continua a precisar de algumas ligações com funções lógicas do PLC sobre componentes de segurança.

3.4.3. Comunicação Drivers – Motores

Ambos os motores são alimentados em corrente alternada trifásica, como já foi referido. Contudo o motor associado ao movimento transversal do carro do bloco de impregnação possui *encoder* utilizado no feedback do controlo em malha fechada do driver do servomotor.

Não sendo previsível nenhuma situação em que possa ter interesse em monitorizar ou alterar a comunicação entre o servomotor e respetivo controlador não se aprofundou esta ligação.

Foram retirados da configuração do “VFD” os parâmetros que permitem retirar a curva de tensão em função de frequência. A configuração é versátil e permite configurar curvas de diferentes formatos correspondendo pares tensão-frequência; nos valores intermédios de frequência o “VFD” interpola a tensão. No “VFD” estavam programados os pontos descritos na Tabela 2, que permitem retirar os pontos e funções representados no gráfico da Figura 26.

Tabela 2 - Correspondência Tensão-Frequência do controlo escalar V/f do motor de indução trifásico do enrolador.

Frequência (Hz)	Tensão (V)
1,5	13,8
3	18,4
60	230

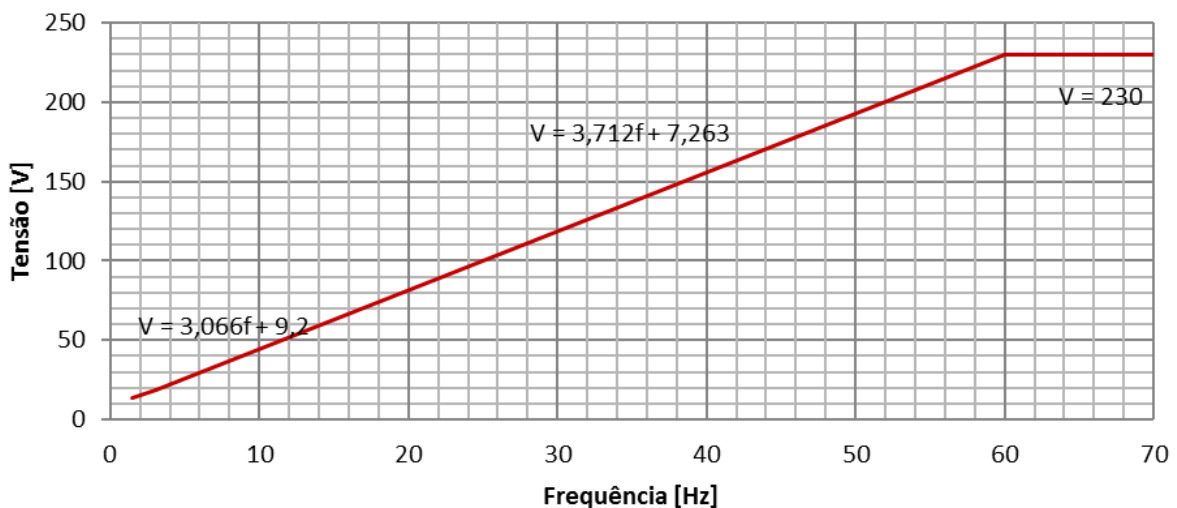


Figura 26- Curvas V/f configuradas no "VFD" do motor de indução do enrolador.

Contudo, sabendo que o motor do enrolador é controlado em modo escalar V/f constante, então a intensidade de corrente nos terminais do motor são função do binário do motor. Foram utilizados sensores de corrente ACS712, modelo PTR002627 da iTeaDStudios, de gama de funcionamento -5 a 5 A, ligados a uma placa de desenvolvimento Velleman ATmega328 Uno, para retirar valores de intensidade para vários valores de forças resistivas ao movimento do tambor do enrolador.

A força resistiva foi realizada manualmente, a tentar parar o tambor.

Como em todas as aplicações industriais, os sinais possuem ruído. Neste caso, o ruído medido pelo sensor de corrente é da ordem da variação de corrente que se pretende medir.

À partida, podia ser utilizado um filtro passa-baixo, realizar uma média móvel na programação da leitura ou utilizar mais do que uma fase para medir a corrente para eliminar, o quanto possível, o ruído.

Efetivamente a intensidade de corrente será função do binário, mas é necessário ter em conta que o motor é sobredimensionado, como se viu na secção 3.1.

A corrente consumida numa fase, sem qualquer carga, é cerca de 1,80 A, como se verifica no amperímetro do variador de frequência e no sensor ACS712. Pode-se considerar que a potência máxima é igual à de consumo do motor:

$$P_{max} = I V \cos(\varphi)$$

Sendo I a corrente, V a tensão e $\cos(\varphi)$ o factor de potência.

Por outro lado, a potência mecânica é:

$$P_{mec} = w \times T = P_{max} \times \eta_{total}$$

Com

$$\eta_{total} \cong \eta_{motor} \times \eta_{reductor} = 0,75 \times 0,66 = 0,50$$

Assim, intensidade de corrente em cada uma das fases pode ser estimada como:

$$I = \frac{w T}{\eta_{total} \times V \times \cos(\varphi)}$$

Para a velocidade de 15 rpm:

$$V = 3,712 \times f + 7,263 = 3,712 \times \frac{15}{60} + 7,263 = 8,191 \text{ V}$$

$$I = \frac{\frac{15 \times 2 \times \pi}{60} \times T}{0,50 \times 8,191 \times 0,505} = 0,765 \times T$$

A variação de 1 N no pré-impregnado, corresponderá a 4,5 mNm.

$$I = 0,765 \times 0,0045 = 0,0034 \text{ A}$$

Ora para a sensibilidade do sensor de 185 mV/A, esta variação de corrente equivale a 0,629 mV na porta de entrada de uma placa de desenvolvimento, que, mesmo reduzindo a gama de leitura para 0 a 3V, possui uma resolução de $3/1024 = 2,9 \text{ mV}$. Assim sendo a resolução do sistema seria apenas de 4,61 N.

Concluiu-se assim que não há possibilidade de utilização da medição do consumo energético do motor para prever a tensão da fibra.

Por outro lado, permite tirar conclusões quanto ao seu funcionamento em malha aberta.

A inexistência de feedback implica que a velocidade de rotação do tambor do enrolador não é necessariamente igual à velocidade pretendida. Contudo, é de esperar apenas variações de velocidade desprezáveis, devido a alterações da tensão da fibra, na gama de funcionamento da máquina, dado o sobredimensionamento do motor.

Os motores de indução, como foi referido, próximo do ponto nominal de funcionamento, tem variações muito baixas de velocidade real com a variação de binário resistivo.

Para comprovar esse baixo efeito, basta fazer alguns cálculos simplificados. Aproximando a curva, na zona de funcionamento na vizinhança do ponto nominal, a uma reta, pode-se partir do princípio que:

$$T = \frac{T_n (w_s - w)}{(w_s - w_n)}$$

Sendo T o binário de funcionamento, w a velocidade do motor, w_n e T_n , respetivamente, a velocidade e binário nominais e w_s a velocidade síncrona. Manipulando algebricamente a expressão, fica:

$$(w_s - w) = \frac{(w_s - w_n) \times T}{T_n} = \frac{s_n \times w_s \times T}{T_n}$$

Sendo o controlo em modo escalar V/f, o escorregamento pode ser considerado constante e igual ao nominal, s_n :

$$s_n = \frac{1800 - 1735}{1800} = 3,61\%$$

Relembrando, o binário nominal, que é constante para o controlo V/f constante, é igual a 2,06 Nm e que o binário máximo esperado é de 0,45 Nm. Para o caso de velocidade de sincronismo de 150 rpm, que deverá originar um ponto de funcionamento perto das 3 rpm do tambor:

$$(w_s - w) = \frac{0,0361 \times 150 \times 0,45}{2,06} = 1,18 \text{ rpm}$$

$$w = 150 - 1,18 = 148,82 \text{ rpm}$$

Em termos relativos

$$\frac{w_s - w}{w_s} = \frac{1,18}{150} = 0,79\%$$

Como se verifica é uma variação de velocidade desprezável que, em termos absolutos máximos, no tambor corresponde a 0,024 rpm e na fibra a 0,57 mm/s.

É de reforçar que os valores em comparação são entre a situação de carga máxima a velocidade máxima e o caso ideal de força nula que, fora efeitos viscosos e de atrito nos elementos mecânicos do enrolador, implicaria o motor a rodar à velocidade síncrona.

Assim sendo, não se verifica necessidade, no contexto deste trabalho, de fechar a malha do controlo da velocidade do enrolador, porque pode ser considerada suficientemente independente do controlo de tensão da fibra, na gama de funcionamento proposta.

4. Solução Adotada

A primeira opção considerada para controlo de tensão no enrolamento foi alterar o funcionamento do enrolador, de modo a que a velocidade do seu motor fosse aquela que garantisse uma intensidade de corrente nos seus terminais correspondente ao binário necessário para impor a tensão desejada. Devido às limitações referidas sobre o PLC e HMI, não serem reprogramáveis, e ao motor estar sobredimensionado, impossibilitando um controlo de binário na gama de funcionamento, não foram efetuadas alterações no enrolador.

Dito isto, era necessário um mecanismo novo para controlar a tensão. Poderia ser montado no bloco de impregnação ou fora dele, entre o alimentador e a máquina de pré-impregnação. Alterar o funcionamento do alimentador inicial não foi considerado pois não seria uma solução replicável a baixo custo para a utilização simultânea de mais do que um desenrolador de fibra. Assim sendo, em primeiro lugar, é mandatário produzir um novo alimentador de fibra, completamente independente do existente.

A replicabilidade do sistema produzido permitirá utilizar várias fibras de diferentes tipos, simultaneamente. Assim, é intuitivo que haverá necessidade de um controlo da tensão independente e para valores diferentes, para cada uma dessas fibras, antes de as mesclar, dadas as suas diferentes características. Assim, foi decidido realizar o controlo de tensão fora do bloco de impregnação.

Esta não é a opção ideal para controlar a tensão no enrolamento nem no banho de resina, mas é a opção mais versátil entre as duas. É possível fazer uma estimativa do aumento de tensão devido a atritos, por via experimental, que permite ajustar a tensão de desenrolamento, para um valor mais baixo, que irá corresponder, aproximadamente, a uma dada tensão de fibra desejada no banho de resina ou no enrolamento. Por outro lado, se forem usados mais do que um alimentador de fibra, ao mesmo tempo, não comprometerá o seu funcionamento pela tensão configurada não ser compatível para todas as fibras. As duas soluções são possíveis de serem juntas, produzindo um controlo de tensão que garante os dois objetivos, por exemplo, alterando a tensão desejada de desenrolamento para cada uma das fibras para controlar a tensão no bloco de impregnação.

São apresentadas soluções que permitem este controlo se, futuramente, for considerado essencial o controlo de tensão no bloco de impregnação, mas foi optado por controlo de tensão apenas no desenrolamento por satisfazer os objetivos atuais.

A solução adotada é composta por três módulos distintos, o desenrolador, o controlador de tensão e o sensor de posição. A solução é de estrutura semelhante ao retratado no final da secção 2.2, na Figura 9 da página 14.

O desenrolador será composto por um motor DC de íman permanente e o respetivo *driver*. Vai estar em malha fechada, uma vez que o motor vai ter instalado um transdutor de velocidade que permite uma melhor performance. O segundo módulo do alimentador, chamado controlador

de tensão, será um *dancer*, composto por um conjunto de três rolos, sendo que um deles estará solidário a um cilindro pneumático. Apesar de uma solução baseada em células de carga ter sido ponderada, por ser mais compacta, não permite, tal como estudado no capítulo 2, absorver algumas oscilações de tensão devido ao desenrolamento dos rolos não ser uniforme, permitindo também um controlo do motor menos exigente e rigoroso, e, conseqüentemente, possibilitando hipóteses de menor custo. O terceiro módulo é incluído e necessário no funcionamento do controlador de tensão para medir a posição do *dancer*.

As seguintes secções irão detalhar estas três componentes da solução adotada e, no final, será apresentada uma célula de carga implementável no bloco de impregnação.

4.1. Desenrolador

Como foi referido anteriormente, é necessário desenvolver um desenrolador de baixo custo para cumprir o objetivo da replicabilidade, não sendo assim adaptado o desenrolador inicial.

O desenrolador teria de consistir num veio onde monta a bobina de material, mas o seu controlo da alimentação poderia recorrer a um motor ou um travão. A solução escolhida foi utilizar um motor por ser mais versátil. Um dos problemas do travão é que este fornece apenas binário contrário ao movimento do desenrolador, não possibilitando enrolar de novo o material, não impondo uma tensão adequada se o enrolador da máquina de pré-impregnação estiver parado, o que significa que, pelo menos nos instantes iniciais de enrolamento da fibra, até esta estar completamente esticada, a tensão não será controlada. O motor permite enrolar a fibra em excesso, para estica-la, antes de iniciar o processo de impregnação, para garantir sempre a tensão desejada.

Basicamente, em conjunto com o *dancer*, o motor irá enrolar ou desenrolar a menor velocidade se for necessário aumentar a tensão da fibra ou desenrolar a uma maior velocidade se a tensão for excessiva.

Antes de escolher o tipo de motor é necessário estudar os requisitos do mesmo.

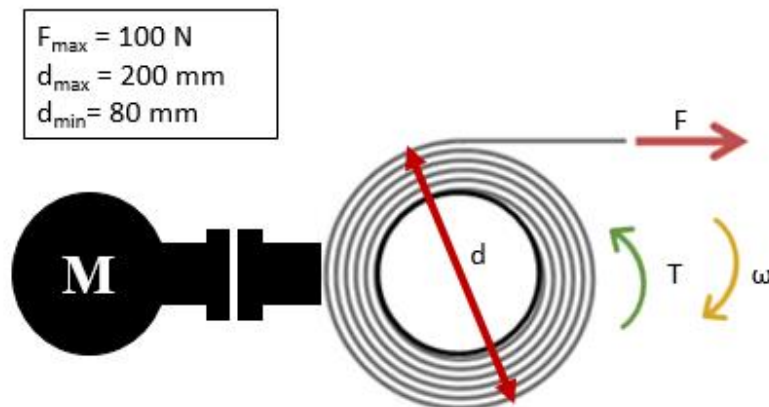


Figura 27 - Ilustração das dimensões e solicitações importantes para o dimensionamento do desenrolador

A velocidade de rotação do alimentador tem de ser compatível com a velocidade de rotação do tambor do enrolador. Para isso recorreu-se à velocidade linear da fibra no enrolamento. Relembrando que a velocidade máxima a que se utilizar o enrolador é 3 rpm:

$$v_{linear} = r_{tambor} \times \omega_{tambor}$$

$$v_{linear} = 225 \times \frac{3 \times 2 \times \pi}{60} = 70,69 \text{ mm/s}$$

Sabendo que o diâmetro das bobinas de fibra varia entre os 200 mm e os 80 mm, a velocidade é máxima quando o raio da bobina de fibra é mínimo, assim:

$$\omega_{max} = \frac{v_{linear}}{r_{min}}$$

$$\omega_{max} = \frac{70,69}{40} = 1,77 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 16,88 \text{ rpm}$$

Deve ser selecionado um motor de velocidade nominal superior de forma a garantir uma margem de segurança e versatilidade para ser usado em situações mais exigentes. Um motor de 20 rpm a 25 rpm deverá funcionar até cerca de 5 rpm de enrolamento sem prejudicar o controlo por sobredimensionamento.

O binário necessário é máximo quando, à tensão máxima de fibra, a bobina de fibra se apresenta ao diâmetro máximo. assim:

$$T_{max} = F_{max} \times r_{max}$$

$$T_{max} = 100 \times 0,100 = 10 \text{ Nm}$$

Perante as ordens de grandeza do binário e da velocidade, conclui-se também a necessidade de um redutor.

Os conjuntos de motor e *driver* mais baratos e simples de implementar são, normalmente, os de motores de indução trifásico.

Contudo estamos perante potências mecânicas muito baixas:

$$P = v_{linear} \times F = \omega \times T$$

$$P = 70,69 \times 10^{-3} \times 100 = 7,069 \text{ W}$$

Os motores de indução de potência mais baixa, mais facilmente encontrados no mercado, são de potência nominal de cerca de 120 W. Considerando um motor de 4 polos, a velocidade nominal é na ordem das 1400 rpm, o binário nominal deverá ser na ordem de:

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{120}{1400 \times 2 \times \pi / 60} = 0,82 \text{ Nm}$$

Para calcular uma redução adequada:

$$i = \frac{n_{motor}}{n_{desenrolador}} \times \frac{1400}{25} = 56 \cong 60$$

Esta redução provoca um binário no motor, quando no desenrolamento é de 10 Nm, de:

$$T_{motor} = \frac{T_{enrolador}}{i} = \frac{10}{60} = 0,167 \text{ Nm}$$

Considerando 1% da gama de funcionamento do controlador uma resolução mínima aceitável, que corresponderá a um controlo de 1 N de tensão de fibra, a variação de binário do motor possível terá de ser de:

$$\Delta T_{motor} = 0,01 \times 0,167 = 1,67 \text{ mNm}$$

Esta variação de binário deverá corresponder a uma dada variação da frequência de alimentação do motor. Assim, aproximando a curva característica do motor a uma reta, na zona de funcionamento nominal:

$$\begin{aligned} T &= T_n \times \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s - \omega_n} \\ \Delta T &= T_n \times \frac{\omega_{s2} - \omega}{\omega_{s2} - \omega_n} - T_n \times \frac{\omega_{s1} - \omega}{\omega_{s1} - \omega_n} \\ \frac{\Delta T}{T_n} &= \frac{\omega_{s2} - \omega_{s1}}{s_n \omega_n} \\ \frac{\Delta T}{T_n} s_n &= \frac{f_{s2} - f_{s1}}{f_n} \\ \frac{\Delta T}{T_n} \times s_n &= \frac{\Delta f}{f_n} \\ \frac{0,00167}{0,82} \times \frac{1500 - 1400}{1500} &= \frac{\Delta f}{50} \\ \Delta f &= 0,006789 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Uma resolução de 6,8 mHz é um valor muito reduzido, não havendo soluções económicas que permitam esta qualidade de controlo. Assim sendo a solução, à partida, mais barata, dos motores de indução trifásicos, não é a mais adequada.

Existem versões de motores DC mais adequadas para baixas potências. Os motores de corrente contínua podem ser classificados como motores de íman permanente com escovas, motor sem escovas, e motor de rotor e estator bobinado.

Os motores sem escovas são, por norma, motores mais caros, pois a sua complexidade é maior. Possuem um íman permanente no rotor e um campo magnético é gerado nas bobinas do estator eletronicamente comutadas, sendo necessário sensores de posição para detetar as bobinas que devem ser comutadas.

Motores de estator e rotor bobinados são, geralmente, boas opções para aplicações de controlo de binário ou velocidade. São muito versáteis, pois pode ser possível alterar o seu funcionamento e as suas curvas características, modificando o seu circuito elétrico colocando o estator e rotor em paralelo, em série ou um misto das duas opções.

Este tipo de motor está disponível para uma gama alargada de potências, mas os motores de menor potência são na ordem dos 100 W, o que ainda assim é muito superior à necessária.

Os motores DC, com escovas e de íman permanente, são motores baratos muito adequados a baixas potência. Um campo magnético, num fio condutor percorrido por corrente contínua, origina uma força perpendicular a ambos, como é visível na Figura 28. Assim, várias espiras, sujeitas a um campo magnético, percorridas por corrente contínua, comutada pelas escovas fixas, originam um binário no rotor e o respetivo movimento [20].

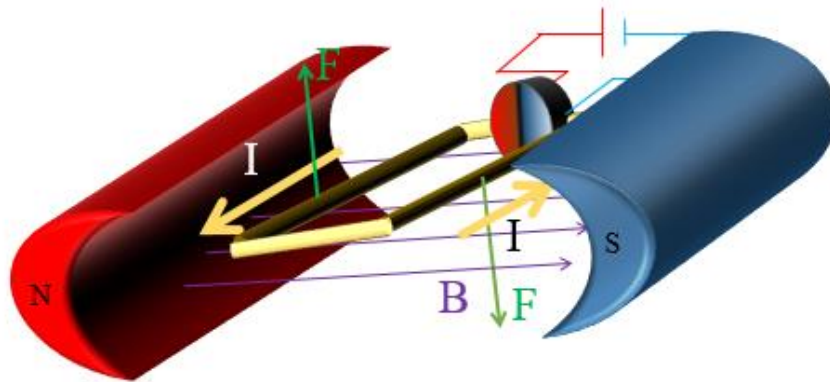


Figura 28 - Princípio de funcionamento de um motor DC com escovas e íman permanente.

A velocidade e binário do movimento do motor são função da tensão e corrente de alimentação do motor.

$$P_m = T \times \omega = I \times V \times \eta$$

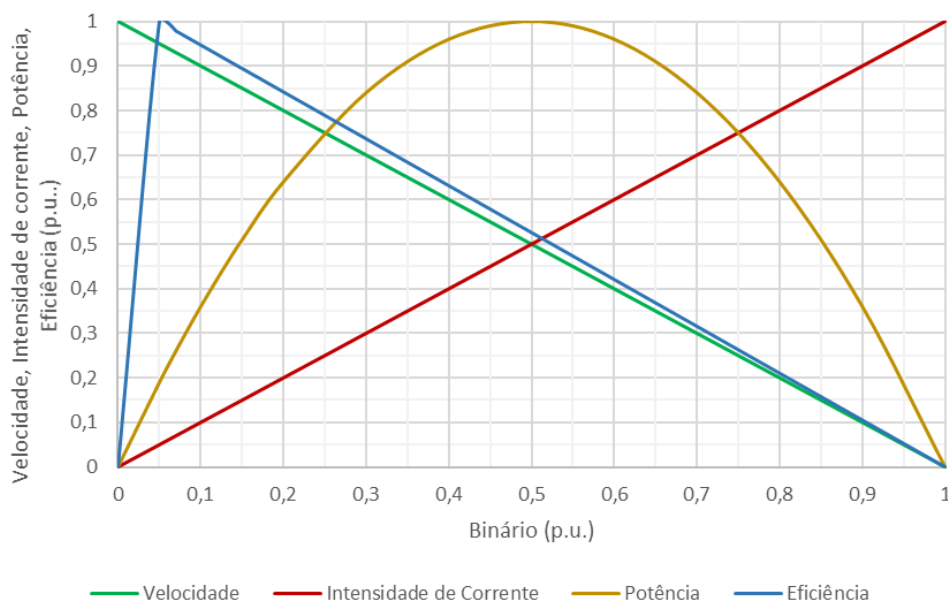


Figura 29 - Gráfico das curvas caraterísticas de um motor DC de íman permanente genérico, para tensão constante.

A Figura 29 é um exemplo das curvas de um motor DC de íman permanente, para tensão constante. Os valores são relativos aos valores máximos das respetivas grandezas. Como se verifica o motor tem uma característica linear de binário em função da velocidade para a mesma tensão.

É possível controlar a velocidade do motor, apenas ajustando a tensão de alimentação. Ajustando a tensão de alimentação, é possível deslocar a curva característica, fazendo alterar o par binário-velocidade. Por exemplo, se o motor possuir um transdutor de velocidade, é possível, fechar a malha do sistema e ajustar a tensão para que a correspondência do binário resistente seja a velocidade pretendida. Controlo de binário é por sua vez, geralmente, feito em corrente. O controlador fornece corrente a uma intensidade constante, ao motor, que dependente da tensão velocidade adequada para o binário desejado [26].

Neste caso é preciso ter um cuidado particular com o controlador. Uma vez que o motor estará a fazer a função de um travão, ou seja, no 2º quadrante da Figura 30, estará a produzir energia e o circuito terá de ter capacidade de eliminar essa energia em excesso.

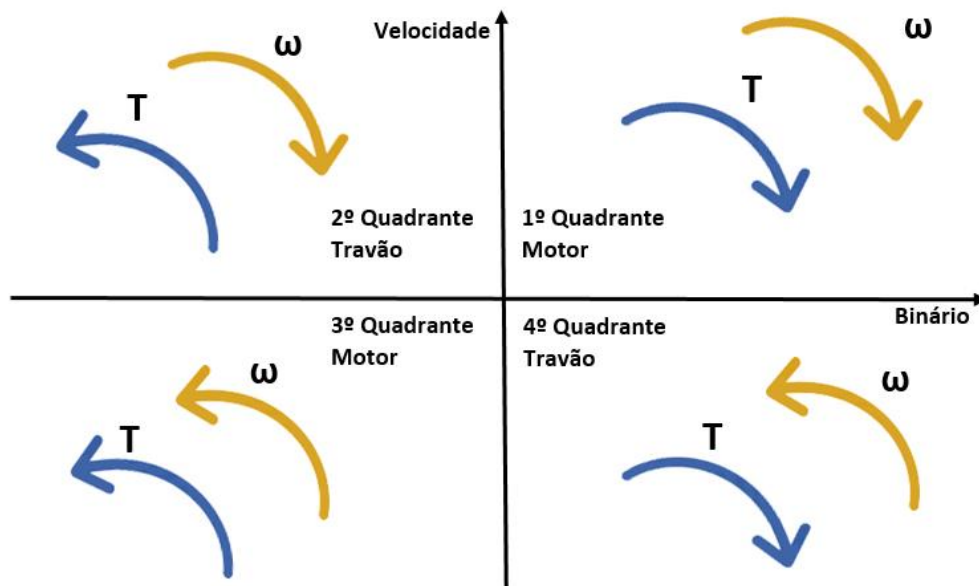


Figura 30 - Ilustração dos 4 quadrantes de funcionamento de um motor.

Para funcionar no terceiro quadrante, poderia ser suficiente inverter a polaridade do rotor. Contudo, para funcionar no 2º e 4º quadrante é necessário dissipar, regenerar ou armazenar a energia.

A dissipação de energia é o caso em que o controlador consome a energia produzida por exemplo numa resistência ou outro tipo de componente. Uma função regenerativa permite ao *driver* do motor enviar a energia produzida para a rede que o alimenta, o que leva a uma poupança energética. No caso de armazenar energia, pode utilizar a energia proveniente de travagens momentâneas, para alimentar o motor, quando voltar ao funcionamento normal, esta solução não é adequada para um funcionamento contínuo nos quadrantes par.

Foi escolhido a Kelvin Gear como fornecedor pelos seus preços competitivos e boa qualidade no serviço de apoio ao cliente. Dos seus catálogos, Anexo D, foi escolhido o modelo GR63x25 24V, com um redutor K200 de redução 162,36:1. A tabela da Figura 31 tem destacada a opção tomada. O binário nominal é de 11,19 Nm e a velocidade nominal de 20,02 rpm. A velocidade no vazio, ou máxima, é de 22,17 rpm [27].

Os dois pontos de funcionamento conhecidos deste motorreductor permitem retirar a curva velocidade-binário para 24 V. No gráfico da Figura 32, é possível ver essa curva e, a verde, a área de funcionamento prevista do alimentador simplificada, delimitada pela potência, binário e velocidade máximas necessárias.

KELVIN			MOTORES DE C.C. Serie: GR63.xx											
			GR63x25 12 V			GR63x25 24 V			GR63x55 12 V			GR63x55 24 V		
Reducción $i = X:1$	Nº pasos	Eficiencia	Velocidad vacío V_0 (r.p.m.)	Velocidad nominal V_n (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)	Velocidad vacío V_0 (r.p.m.)	Velocidad nominal V_n (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)	Velocidad vacío V_0 (r.p.m.)	Velocidad nominal V_n (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)	Velocidad vacío V_0 (r.p.m.)	Velocidad nominal V_n (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)
7.65	2	0.81	470.59	405.23	0.71	470.59	424.84	0.65	457.52	392.16	1.79	477.12	411.76	1.79
9.81	2	0.81	366.97	316.00	0.90	366.97	331.29	0.83	356.78	305.81	2.29	372.07	321.10	2.30
18.78	3	0.73	191.69	165.07	1.56	191.69	173.06	1.44	186.37	159.74	3.95	194.36	167.73	3.96
24.1	3	0.73	149.38	128.63	2.00	149.38	134.85	1.84	145.23	124.48	5.07	151.45	130.71	5.08
31.12	3	0.73	115.68	99.61	2.58	115.68	104.43	2.38	112.47	96.40	6.55	117.29	101.22	6.56
39.93	3	0.73	90.16	77.64	3.32	90.16	81.39	3.06	87.65	75.13	8.40	91.41	78.89	8.41
56.34	4	0.66	63.90	55.02	4.21	63.90	57.69	3.88	62.12	53.25	10.67	64.79	55.91	10.68
72.29	4	0.66	49.80	42.88	5.40	49.80	44.96	4.98	48.42	41.50	13.69	50.49	43.57	13.71
81.23	4	0.66	44.32	38.16	6.07	44.32	40.01	5.60	43.09	36.93	15.38	44.93	38.78	15.40
93.35	4	0.66	38.56	33.21	6.98	38.56	34.82	6.43	37.49	32.14	17.67	39.10	33.74	17.70
104.22	4	0.66	34.54	29.74	7.79	34.54	31.18	7.18	33.58	28.79	19.73	35.02	30.22	19.76
119.78	4	0.66	30.06	25.88	8.95	30.06	27.13	8.25	29.22	25.05	22.68	30.47	26.30	22.72
126.54	4	0.66	28.45	24.50	9.46	28.45	25.88	8.72	27.66	23.71	23.96	28.84	24.89	24.00
162.36	4	0.66	22.17	19.09	12.13	22.17	20.02	11.19	21.56	18.48		22.48	19.40	
199.36	5	0.59	18.06	15.55	13.41	18.06	16.30	12.31	17.55	15.05		18.31	15.80	
229.14	5	0.59	15.71	13.53	15.41	15.71	14.18	14.21	15.27	13.09	Ex Par max. 25 Nm	15.93	13.75	Ex Par max. 25 Nm
255.81	5	0.59	14.07	12.12	17.20	14.07	12.70	15.86	13.68	11.73		14.27	12.31	
293.99	5	0.59	12.25	10.54	19.77	12.25	11.05	18.23	11.91	10.20		12.42	10.71	
310.61	5	0.59	11.59	9.96	20.89	11.59	10.46	19.26	11.27	9.66		11.75	10.14	
398.52	5	0.59	9.03	7.78	Ex	9.03	8.16	24.71	8.78	7.53		9.16	7.90	

Figura 31 - Seleção efetuada das tabelas dos catálogos dos motorredutores da Kelvin Gear [27].

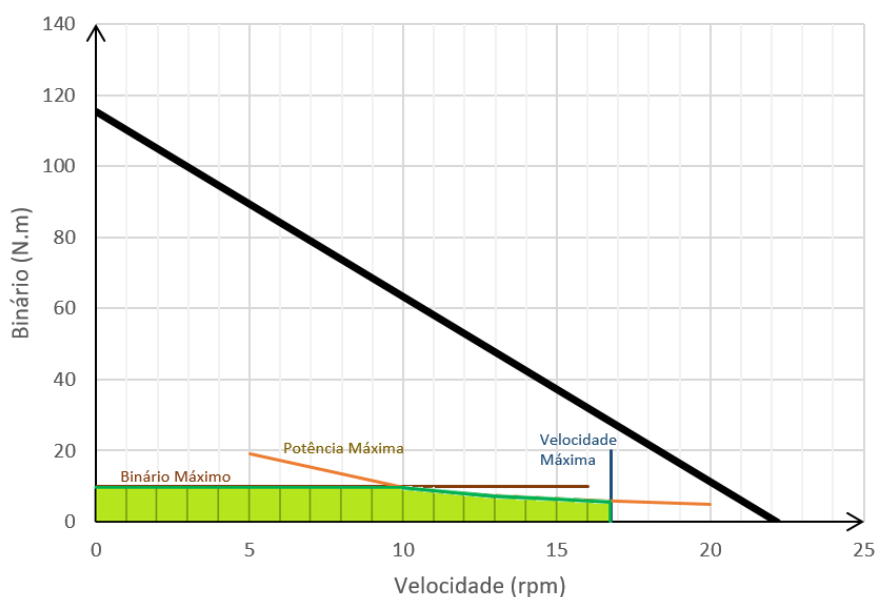


Figura 32 - Curva caraterística velocidade-binário do motorreductor escolhido. A verde está sombreada a zona de funcionamento do alimentador.

O *driver* escolhido foi, entre os recomendados pelo fornecedor, aquele que possibilitava a utilização nos quatro quadrantes de funcionamento. Trata-se de um MCDC3006 da Faulhaber, com a sua ficha técnica no Anexo E. Este modelo possibilita comunicação RS232 e controlo em malha fechada [28].

Assim, para aproveitar ao máximo as suas possibilidades, utilizou-se o encoder HEDS5540 [29], que veio montado no motor, possibilitando diferentes abordagens mais complexas, se tal for adequado.

Este driver não tem transformador incorporado. É necessária uma fonte de alimentação DC e foi escolhida uma recomendada pela marca, o modelo DR-120-24 da Mean Well [30], com ficha técnica no Anexo F.

O custo total do enrolador foi de 801,49 €. A seguinte tabela explicita o valor de cada componente.

Tabela 3 - Custos das componentes do alimentador implementado

Componente	Preço
Motor	235,00 €
Encoder	85,00 €
Driver	400,00 €
Fonte de Alimentação	46,48 €
Outras Despesas (custos de envio, transporte e transferência)	35 €
Total:	801,49€

4.2. Controlador de Tensão

Foi decidido utilizar um *dancer* para o controlo de tensão da fibra. O *dancer* é um elemento móvel capaz de absorver algumas oscilações de tensão e vai consistir num cilindro pneumático e um conjunto de três rolos. Durante o funcionamento atual da máquina de pré-impregnação são observadas instabilidades no alimentar da fibra quando a fibra muda de direção de desenrolar, como representado na Figura 33.

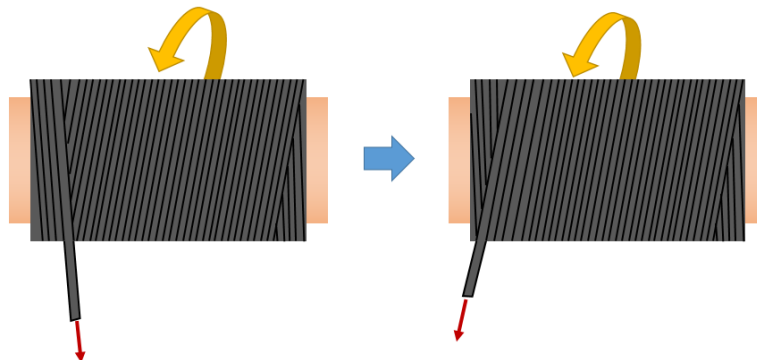


Figura 33 - Ilustração da variação de direção de desenrolamento ao longo que o rolo é consumido.

O cilindro pneumático, desde que não esteja em nenhuma das suas posições extremas, efetua uma força constante apenas proporcional à pressão do ar nas suas camaras. Assim, se for garantido, uma posição não extrema, a tensão da fibra será sempre proporcional à pressão.

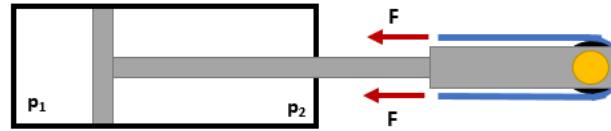


Figura 34 - Ilustração dos esforços no dancer pretendido implementar.

Se $p_2 = 0$ bar, desprezando forças de atrito, então:

$$A_1 \times p_1 = 2 \times F$$

$$F = \frac{A_1 \times p_1}{2}$$

Para desprezar as forças de atrito, o cilindro pneumático deve ser de baixo atrito. O fornecedor escolhido foi a SMC, devido a possuírem escritórios e apoio ao cliente em Portugal e, sobretudo, às características dos seus cilindros de baixo atrito que são bastante robustos sem necessidades especiais de guiamento ou proteção contra cargas laterais.

A SMC possui três modelos de cilindros de baixo atrito para a gama de cargas em causa, MQQ, MQM e MQP. O primeiro caso é o mais adequado, pois é otimizado para aplicações de controlo de força e de menor frequência de funcionamento, como visto no catálogo no Anexo G. MQM é um cilindro de baixo atrito para acionamentos de elevada frequência e o MQP são demasiado compactos, com comprimento de haste demasiado baixo, e só de simples efeito, com retorno por gravidade. Dentro da série MQQ, existe os MQQL que são cilindros de baixo atrito com rolamentos de esferas que permite resistência a esforços laterais e faz guiamento à haste. O baixo atrito é garantido por fabrico muito cuidado de todas as peças em contacto com materiais patenteados [31].

Para dimensionar o cilindro foi escolhido o diâmetro de êmbolo necessário para garantir uma força superior a 200 N para 5 bar, como visto na Figura 35. Foi dimensionado para 5 bar porque, apesar da rede de ar comprimido do INEGI poder fornecer ar a uma pressão de cerca de 7 bar, os técnicos que a utilizam, fazem-no, normalmente, até um máximo de 6 bar de pressão, que depois de quedas de pressão nas válvulas e unidades de tratamento de ar pode ser menor, sendo assim utilizado para efeitos de cálculo o valor de 5 bar, como medida conservadora. O cilindro escolhido foi o MQQL25-100, com o máximo comprimento de haste possível, 100 mm, para aumentar ao máximo a capacidade de absorver flutuações de tensão.

Theoretical Output Unit: N

OUT IN

Bore size (mm)	Rod size (mm)	Direction	Piston area (mm ²)	Operating pressure (MPa)						
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	6	IN	50.3	5.0	10.1	15.1	20.1	25.2	30.2	35.2
		OUT	78.5	7.9	15.7	23.6	31.4	39.3	47.1	55.0
16	8	IN	145.8	14.9	29.2	43.7	58.3	72.9	87.5	102.1
		OUT	196.1	19.6	39.2	58.9	78.4	98.1	117.7	137.3
20	10	IN	235.6	23.6	47.1	70.7	94.2	117.8	141.4	164.9
		OUT	314.2	31.4	62.8	94.3	125.7	157.1	188.5	219.9
25	12	IN	377.8	37.8	75.6	113.3	151.1	188.9	226.7	262.5
		OUT	490.9	49.1	98.2	147.3	196.4	245.5	294.5	343.6
30	16	IN	505.8	50.6	101.2	151.8	202.4	253.0	303.6	354.2
		OUT	706.9	70.7	141.4	212.1	282.8	353.5	424.2	494.9
40	16	IN	1055.6	105.6	211.2	316.8	422.4	528.0	633.6	739.2
		OUT	1256.6	125.7	251.4	377.1	502.8	628.5	754.2	879.9

Figura 35 - Escolha do diâmetro do cilindro pneumático de baixo atrito pelas tabelas do fornecedor SMC [31].

Não é previsto que a tensão varie ao longo do processo, assim foi escolhida uma válvula reguladora de pressão manual, sendo configurada no início do processamento da fibra, mantendo-se assim até ao fim, sem necessidade de variação automática.

A válvula escolhida foi uma válvula de precisão, também da SMC, com o catálogo no Anexo H. É essencial que, independentemente do caudal, a válvula mantenha sempre a pressão constante a jusante e, assim, é necessário verificar essa característica nos dados técnicos das válvulas.

A válvula escolhida foi uma IR2220-F02-A com a característica pressão-caudal demonstrada no seguinte gráfico e como se vê a queda de pressão é independente do caudal na gama de funcionamento.

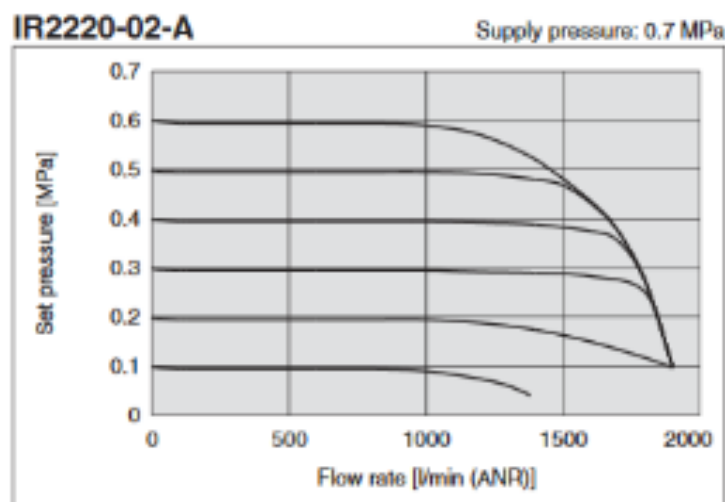


Figura 36 - Curva característica caudal-pressão a jusante da válvula escolhida para o dancer [32].

O circuito pneumático associado a este cilindro e reguladora de pressão é o da Figura 37. Os componentes necessários comprar e os respetivos preços estão listados na Tabela 4 e teve um custo total de 774,64€.

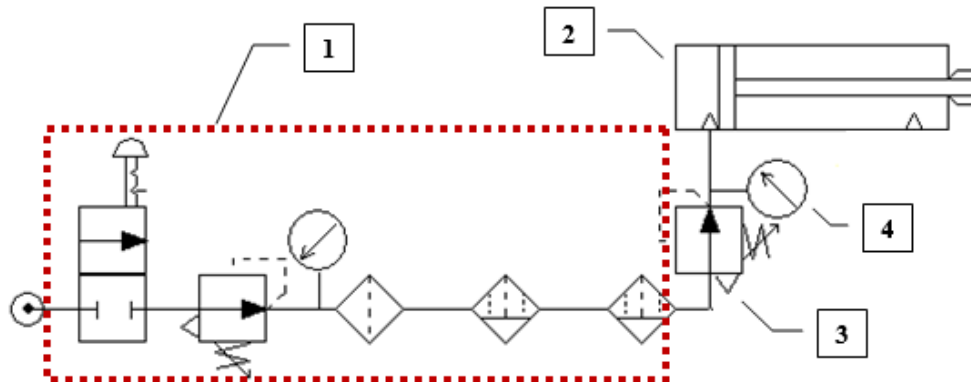


Figura 37 - Circuito pneumático do dancer. Inclui a unidade de tratamento de ar (1), o cilindro pneumático de baixo atrito (2), a válvula reguladora de pressão (3) e o medidor de pressão (4).

Tabela 4 - Custo dos componentes pneumáticos necessários para produzir o dancer.

#	Componente	Preço
1	Unidade de tratamento de ar	52,48 €
-	Regulador de Caudal	7,52 €
2	Cilindro	417,41 €
3	Reguladora de Pressão	51,96 €
4	Pressóstato Digital	61,27 €
-	Tubos, Ligações, Silenciador	31,27 €
-	Portes de Envio	7,90 €
Total:		774,64€

4.3. Sensor de Posição

Existem dois grandes tipos de sensores de posição, sensores com contacto e sensores sem contacto. Dentro dos sensores de posição com contacto existe uma solução barata que são os sensores do tipo resistivo ou potenciómetros. Entre os sensores sem contacto é possível encontrar soluções como os LVDT, magnetostrictivos, laser ou ultrassónicos.

Foi desenvolvido uma solução própria para implementar neste sistema que recorre a fotorresistências para detetar a posição do *dancer* com características mais focadas no seu objetivo. O sensor para este sistema, além de barato para diminuir o custo global da solução, terá de possuir a melhor sensibilidade possível, outras características como robustez, durabilidade ou precisão não são prioridades pois não há necessidade de elevado rigor na medição de posição do *dancer*, apenas perceber se está próxima ou afastada dos limites de operação do cilindro pneumático.

Potenciómetro

Este tipo de sensor consiste num divisor de tensão variável com a posição, assim a tensão à saída do sensor é função da posição [33]. Os potenciómetros têm como principais vantagens o preço e a linearidade, contudo a presença de contacto não é adequado a esta aplicação. O contacto provoca existência de atrito que irá afetar a medição realizada, uma vez que esta é função de outra força, a tensão da fibra.

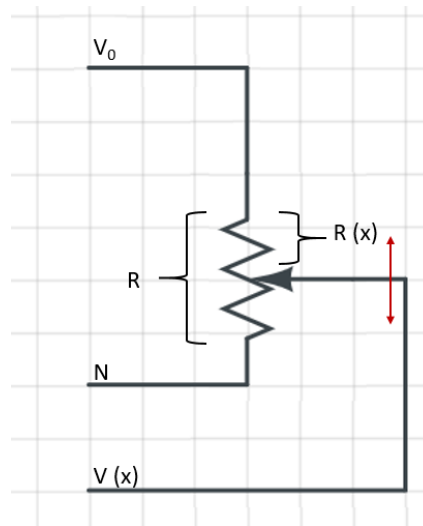


Figura 38 - Divisor de tensão, o princípio de funcionamento de um sensor de posição resistivo

Seria possível utilizar uma solução com contacto, desde que as forças envolvidas fossem de grandeza desprezável, contudo é habitual encontrar sensores cujo o contacto dá origem a forças na ordem de 1 a 5 N, que é cerca de 1% da força máxima do cilindro pneumático. Existem soluções com contacto com forças envolvidas menores, como por exemplo o Sensor de Posição Linear KITPL145 da Vishay. Este sensor consiste num material polimérico condutível de baixo atrito, e uma escova que fecha o circuito do potenciómetro e se cola ao elemento móvel.

Tabela 5 - Dados sobre algumas características do sensor KITPL145 da Vishay [25].

Resolução	Teoricamente infinita
Linearidade	0,1 %
Curso	100 mm
Força Resistiva	0,08 N
Custo	375,00 €

A Tabela 5 resume os dados mais importantes deste sensor. Conclui-se que, para cumprir os requisitos de baixo atrito, tem um custo demasiado elevado em comparação com os resistivos normais, sendo assim mais adequado explorar soluções sem contacto.

LVDT

Um LVDT é um sensor do tipo indutivo que consiste num transformador variável com a posição a medir. São compostos por um núcleo magnético solidário ao movimento, que se desloca no interior de 3 enrolamentos alinhados. Um dos enrolamentos é alimentado a corrente alternada e é induzida corrente nos enrolamentos secundários função da posição do núcleo magnético. Normalmente, os enrolamentos secundários estão ligados em série e com polaridade oposta, assim sendo as correntes induzidas em cada um deles terão sentidos opostos. Assim na posição central do sensor a corrente será nula, e nos extremos a corrente terá a mesma amplitude, mas fase oposta [33]. A Figura 39 e Figura 40 são ilustrações do funcionamento de um LVDT.

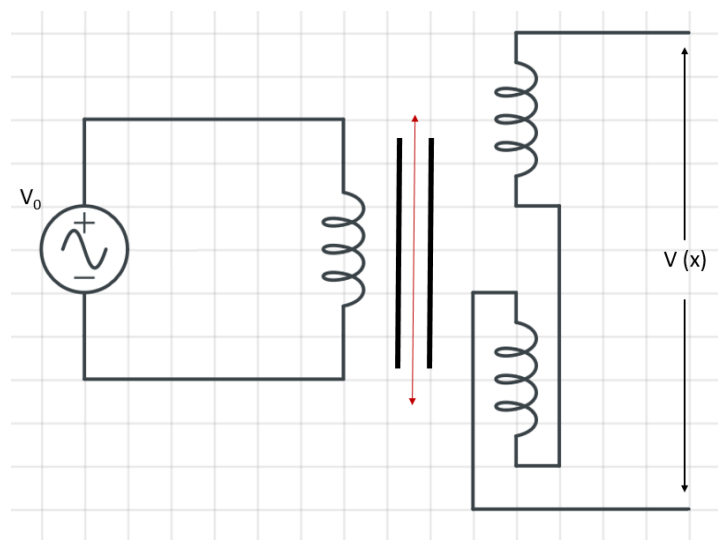


Figura 39 - Circuito elétrico básico de um LVDT.

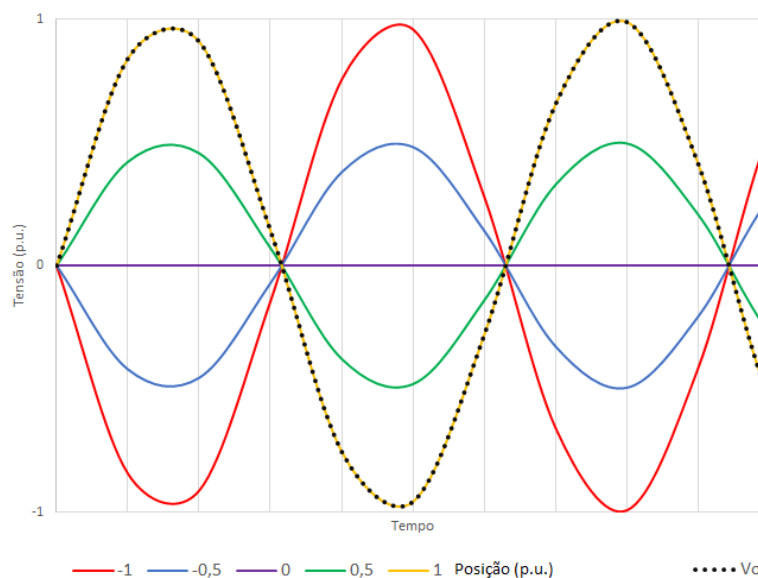


Figura 40 - Variação do sinal de saída em amplitude de um LVDT com a posição do núcleo. A posição 0 equivale à posição central, e -1 e 1 às duas posições extremas.

A elevada linearidade e durabilidade, sem existência de contacto, fazem do LVDT uma solução muito interessante para medir a posição do cilindro, contudo o preço é relativamente elevado. Por exemplo, o LVDT E 2000 da Measurement Specialties tem um curso que satisfaz os requisitos [34], e cujos dados estão listados na seguinte tabela:

Tabela 6 - Dados sobre algumas características do LVDT E 2000 da Measurement Specialties [34].

Resolução	Teoricamente infinita
Linearidade	1 %
Curso	116 mm
Força Resistiva	0 N
Custo	107 €

Esta versão é alimentada em corrente alternada e fornece também um sinal em corrente alternada. Seria necessário desmodular os sinais de saída, que leva à escolha, alternativamente, de uma solução que inclua a desmodulação e deteção de fase, cujo sinal de saída é em corrente contínua. Neste caso em particular, para uso com uma placa de desenvolvimento, é importante que a gama de saída seja de 0 a 5 V. Um exemplo de um LVDT para ser aplicado poderia ser o S050.0 V100.0, sem mola, da Solartron Metrology [35], com os dados na seguinte tabela:

A disparidade do custo prende-se pela necessidade deste exemplar de LVDT possuir um oscilador, para transformar DC em AC para alimentar a bobine principal, e toda a eletrónica necessária para o sinal de saída deste sensor ser de 0 a 5 V.

Tabela 7 - Dados sobre algumas características do LVDT DC-DC [35].

Resolução	Teoricamente infinita
Linearidade	0,2 %
Curso	± 50 mm
Força Resistiva	0 N
Custo	360,54 €

Em comparação com o sensor de posição resistivo, a vantagem é não possuir contacto, o que se reflete, também, no tempo de vida do sensor, que será muito mais longo. O tempo de vida do sensor resistivo seria ainda agravado pela oscilação prevista em torno da posição central do *dancer*. Em termos práticos, iria provocar ainda mais desgaste do sensor, sendo necessário a sua substituição mais cedo.

Magnetostrictivo

A solução do LVDT revela um custo muito elevado para o orçamento disponível. Os sensores magnetostrictivos são uma alternativa entre os sensores sem contacto. São, por exemplo, utilizados, frequentemente, na determinação da posição da real do êmbolo de atuadores

hidráulicos ou pneumáticos, podendo ser montados no interior do cilindro, nalgumas situações em que a haste é oca.

O cilindro pneumático escolhido não permite a utilização deste sensor no seu interior pois a haste é maciça e o corpo exterior é completamente fechado, mas a utilização destes sensores não é restrita ao interior dos atuadores.

Esta solução consiste num íman solidário com a posição a medir e um fio de material magnetostrictivo, isto é, um material cuja microestrutura varia com o efeito de campos magnéticos. A eletrónica do sensor envia um pulso de corrente no fio de material magnetostrictivo que gera um campo magnético radial. A interação com o campo magnético do íman gera, segundo o princípio de Wiedemann, um desvio torsional no fio que se propaga ao longo do seu eixo.

Esta torção é sentida mecanicamente ou por efeito de Villari, que é o contrário do efeito de Wiedemann, em que se gera uma variação de permeabilidade e consequentemente um diferencial de tensão, devido à torção, pela eletrónica do sensor. O tempo decorrido entre a emissão do impulso de corrente e a deteção da torção é utilizado para calcular a posição do íman [36].

Um exemplo de um sensor deste género para ser aplicado poderia ser o TDMTPAAU0040D0FMX, da Transducer Direct [37], com os dados na seguinte tabela:

Tabela 8 - Dados sobre algumas características do sensor magnetostrictivo [37].

Resolução	2 μm^*
Linearidade	0,03%
Curso	102 mm
Força Resistiva	0 N
Custo	222,41€
* - Valor não fornecido pelos fabricantes. Estimado pelos valores típicos da concorrência	

Sensor Laser e Ultrassónico

Existem, ainda, soluções por laser e por ultrassons. A distância é medida com base no tempo que demora um dado sinal emitido pelo sensor a ser refletido no elemento móvel e voltar [33].

O sensor laser, da Banner, Q4XTULAF100-Q8, funciona com uma saída de 0 a 10 V, precisando, assim, ainda de um atenuador adicional, para medir de 0 a 5 V [38]. Os seus dados são descritos na seguinte tabela:

Tabela 9 - Dados sobre algumas características do sensor laser [38].

Resolução	0,15 mm
Linearidade	1%
Curso	100 mm
Força Resistiva	0 N
Custo	246,95 €

Esta solução não possui qualquer contacto e dispensa elementos solidários ao movimento, o que simplifica a implementação do sensor. Contudo, elementos estranhos ao funcionamento do sensor, que interrompam o feixe de luz, podem perturbar o seu funcionamento, sendo suscetível a sujidade, por exemplo. Este tipo de sensores costuma apresentar uma boa largura de banda, mas não é uma prioridade uma vez que se esperam movimentos suaves e lentos para o *dancer*.

Os sensores ultrassónicos são por norma soluções económicas, mas, de forma geral, possuem baixa precisão e as distâncias para os quais estão preparados são geralmente desajustadas e superiores aos 100 mm do curso do cilindro. Mais relevante para a aplicação, é a reduzida resolução destas soluções, na gama de alguns milímetros, o que é muito elevado. Existem sensores mais caros, tecnologicamente mais robustos e de maior qualidade, como, por exemplo, o S18UUAR da Banner [39], como se vê na seguinte tabela:

Tabela 10 - Dados sobre algumas características do sensor supersónico [39].

Resolução	1 mm
Linearidade	0,3%
Curso	270 mm
Força Resistiva	0 N
Custo	238,51 €

É de reparar que, mesmo sendo uma solução com uma resolução e curso menor, não é, ainda, uma solução recomendável. Por outro lado, este tipo de sensores possui uma zona morta, próxima do sensor, que implicam alguns cuidados na montagem.

Em suma, o LVDT, com alimentação DC, é uma solução mais robusta e fiável, mas com maior custo. O sensor magnetostrictivo é uma solução de menor custo, relativamente ao LVDT, que, para as condições de funcionamento, seria uma solução aceitável.

Como já foi referido, nesta situação, em particular, os requisitos mais importantes do sensor não são robustez, elevada linearidade e elevada precisão. Os principais objetivos são a resolução e uma sensibilidade o melhor possível para o curso do cilindro.

As opções, à partida, mais económicas, resistiva e ultrassónica, revelando fragilidades, respetivamente, nas forças resistentes e na resolução para o curso do cilindro pneumático, tiveram de ser postas de parte.

Sensor de Fotorresistências

Com o objetivo de conciliar um custo mais baixo com os principais requisitos para o sensor a aplicar, foi desenvolvido um conceito diferente dos encontrados no mercado de sensores de posição, que recorre a fotorresistências para detetar a posição de um elemento móvel solidário ao movimento.

Fotorresistências são componentes elétricos cuja resistência varia com a intensidade luminosa incidente. Consistem em dois elétrodos separados por um material fotossensível, isto é,

um material cuja resistência à passagem elétrica depende da luz incidente. Reduzindo a superfície iluminada de uma fotoresistência, também é possível variar a resistência deste componente.

Fazendo um divisor de tensão com a fotoresistência de resistência variável com a posição e uma resistência de valor constante, a queda de tensão será também variável com esse movimento, como representado na imagem.

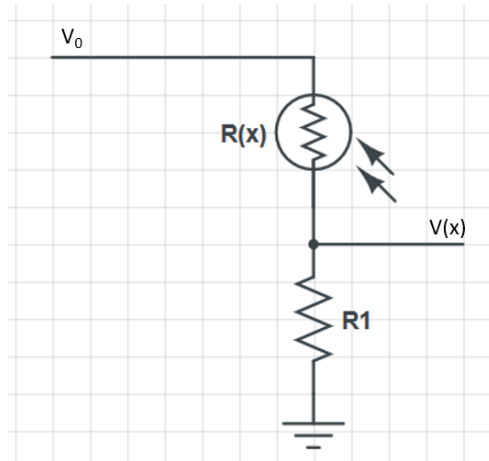


Figura 41 - Circuito elétrico de um divisor de tensão composto por uma fotoresistência.

Assim sendo, a tensão medida num divisor de tensão composto por um conjunto de fotorresistências em série, numa calha, será função da posição de um elemento que se mova paralelo a essa calha. Numa posição extrema, todas as fotorresistências são iluminadas e a resistência é mínima. Na outra, todas elas estão sombreadas pelo objeto móvel, como a Figura 42 esquematiza, e a resistência será máxima.

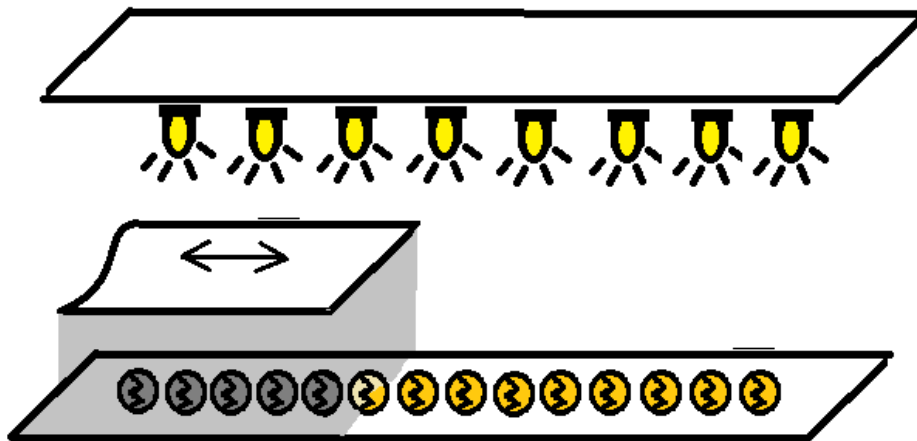


Figura 42 - Ilustração do funcionamento do sensor.

Para garantir que a medição não é afetada pelo estado de iluminação do local onde está montado o sensor, as fotorresistências têm de ser montadas dentro de uma caixa opaca com uma fonte de luz independente, o mais uniforme possível. É ainda interesse que todo o interior e componentes no interior do sensor sejam pretos para refletir menos luz e assim ter menos perturbações nas medições.

Foi realizado um protótipo para implementar na máquina e para testar este conceito na prática.

Recorreu-se a fotorresistências de modelo GM35 do fornecedor Wodeyijia, modelo de menor dimensão disponível num fornecedor de material eletrónico próximo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a loja Aquário. Foram escolhidas as fotorresistências de menor dimensão para procurar um funcionamento mais previsível. Sendo as fotorresistências produtos baratos cuja produção não tem como objetivo a precisão dos componentes, é de prever alguma disparidade nalgumas características, que, idealmente, seriam iguais. Assim, diminui-se o efeito dessas diferenças, no comportamento do transdutor, pois este tenderá a convergir para o comportamento médio dos componentes, mais próximo das características referidas nas fichas técnicas do produto. Entre essas características, que podem ser vistas no Anexo I, uma das mais relevantes é a influência de cada comprimento de onda na característica da fotorresistência. As fotorresistências de CdS, material entre os dois elétrodos, são mais sensíveis à luz de comprimento de onda de 550 nm, na zona de luz visível.

Os LED que fazem parte da fonte luminosa do sensor são do modelo C512A-WNN-CZ0B0151 do fornecedor CREE, LED de alta potência de luz branca [40].

Foi preferido esta versão a LED comuns, porque estes últimos não são capazes de diminuir a resistência das fotorresistência ao seu valor mínimo, e a luz é branca para ser utilizada a zona de espectro de maior absorção das fotorresistências.

A resistência conhecida do divisor de tensão escolhida é de 1 M Ω . Quando as fotorresistências estão completamente iluminadas, a resistência conhecida é muito superior à das anteriores, tendendo a tensão medida para a tensão de alimentação do sensor. Quando estiverem completamente tapadas, a sua resistência é máxima e muito superior à resistência conhecida, tendendo o valor de tensão medida para zero.

Foi adicionado ainda um condensador em paralelo com a resistência conhecida que funciona como filtro passa-baixo, reduzindo o ruído da medição. Foi escolhido um condensador de 180 nF. O ruído não será ainda desprezável, mas foi escolhido este valor de capacidade pois valores superiores começariam a induzir um atraso na medição.

O transdutor possui uma calha de 12 cm com 50 fotorresistências, como se vê na fotografia da Figura 43.

A fonte luminosa no interior do transdutor é composta por 30 LED colocados aos pares ao longo de 12 cm, como se vê na Figura 45.

Para homogeneizar a luz no interior da câmara escura do transdutor, foi colocado um difusor de luz, visível na Figura 44, entre os LED e as fotorresistências.

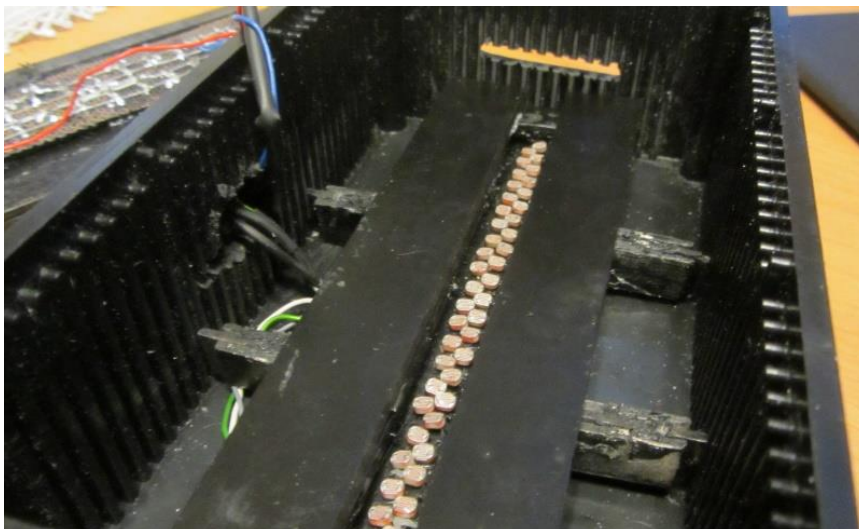


Figura 43 – Fotorresistências dispostas numa calha no interior da caixa preta do transdutor

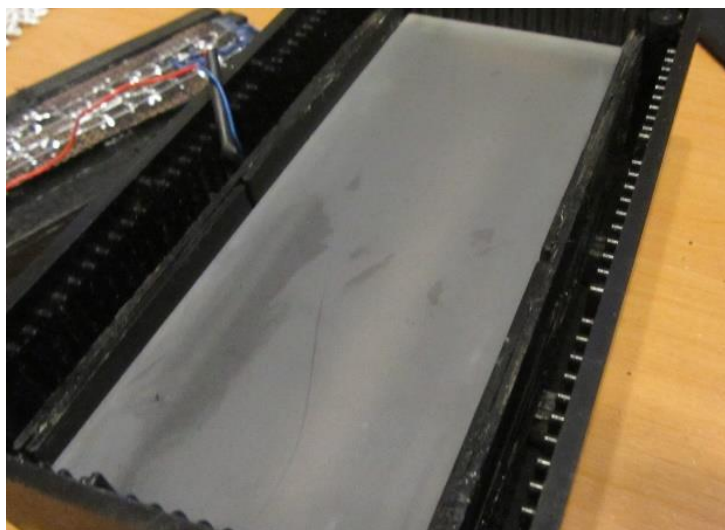


Figura 44 - Placa de material difusor para homogeneizar a luz no interior da caixa preta.



Figura 45 - Os leds foram colocados dois a dois ao longo de uma calha

As figuras seguintes mostram o protótipo completo deste transdutor. Na Figura 46, vê-se o transdutor montado, como o elemento móvel na calha à direita. Na Figura 47 vê-se um desenho tridimensional da vista, em corte transversal do transdutor desenvolvido.



Figura 46 - Aspecto final do transdutor, com o elemento móvel já no interior da caixa, à direita.

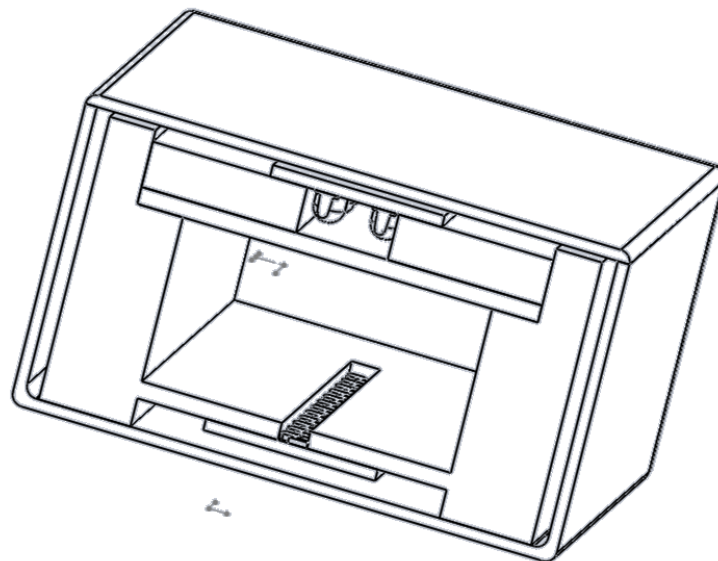


Figura 47 - Corte transversal do sensor em modelação 3D.

A estrutura interior que suporta os componentes foi realizada em madeira, pintada de preto. Possui, nalguns locais, placas de material difusor pintado de preto para, caso o elemento móvel sofra um desvio, não fique preso nas irregularidades da madeira, danificando o transdutor.

O sensor possui uma ficha D9 macho, para ligação ao exterior, com a correspondência da Figura 48.

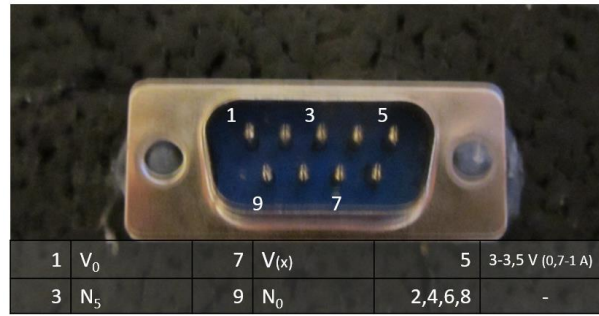


Figura 48 - Ficha D9 macho que serve de interface com o sensor. A legenda identifica cada uma das portas. As portas par não são utilizadas.

Os pinos 1 e 5 correspondem às entradas de dois tipos de corrente diferente. O pino 1 é a entrada de tensão no divisor de tensão das fotorresistências. Uma vez que este transdutor foi projetado para ser utilizado com uma placa de desenvolvimento, a tensão do pino 1 deve ser a tensão adequada para efetuar medições nas portas analógicas da placa. O pino 5 corresponde aos cátodos dos LED, como tal é recomendado ser alimentado entre 3 e 3,5V, nunca ultrapassando 4V. A corrente no pino 5 atinge valores entre 700 mA e 1 A, assim, não é possível utilizar placas de desenvolvimento para alimentar os LED, que geralmente só permitem algumas dezenas de mA.

Os pinos 3 e 9, são, respetivamente, os cátodos do divisor de tensão e dos LED, sendo, naturalmente, o pino 9 ligado ao *ground* da placa de desenvolvimento, se o pino 1 for alimentado por uma placa de desenvolvimento, e o pino 3 ligado ao *ground* da fonte de alimentação dos LED.

O pino 7 é onde deve ser ligado o pino de leitura analógica da placa de desenvolvimento para realizar a medição. O seguinte circuito traduz simplificadaamente o interior do sensor e correspondência com os pinos da ficha D9.

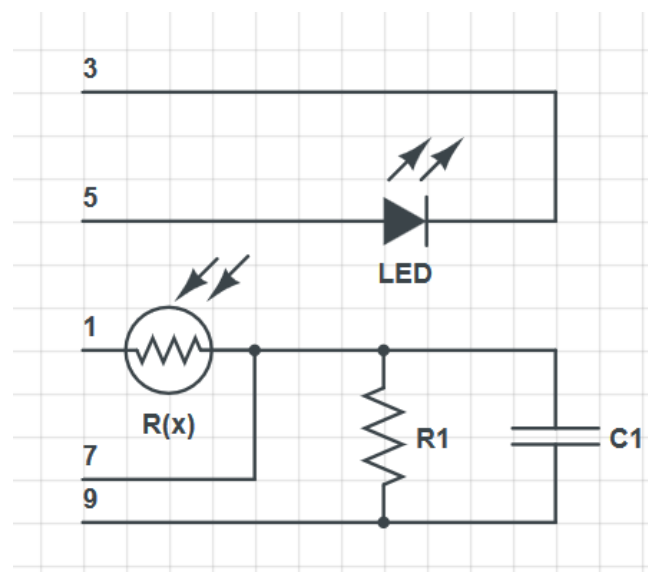


Figura 49 - Circuito elétrico simplificado do sensor. Os números correspondem à identificação dos pinos da ficha D9 da Figura 48.

Para retirar a curva característica, foi utilizado uma placa de desenvolvimento VellemanIO UNO com microcontrolador ATmega328, medindo-se numa porta analógica a tensão no divisor de tensão, no pino 7. A porta analógica converte esse sinal num valor digital. A função de leitura das portas analógicas fornece um valor adimensional de 0 a 1023, correspondente aos 10 bits do conversor A/C do microcontrolador. Ao pino 1 foram fornecidos 5V.

A programação inclui um filtro digital, para diminuir o ruído, tendo sido arbitrado um valor de 100 medições para calcular o valor médio e só este é transmitido ao utilizador. Foram obtidos resultados, visíveis na Figura 50, que permitem retirar a característica do sensor. A posição real foi medida com uma régua de resolução de 1 mm.

Como se verifica, este transdutor não tem uma característica linear. Contudo, possui uma elevada sensibilidade no intervalo de posições de 60 a 80 mm e uma sensibilidade muito baixa nas posições extremas. Uma vez que o transdutor se destina a ser utilizado em conjunto com o *dancer*, esta característica é vantajosa: uma vez que o *dancer* é, idealmente, para manter numa posição central, o sensor terá uma capacidade maior de detetar uma variação de posição nessa zona do que nas zonas extremas, onde será menos utilizado.

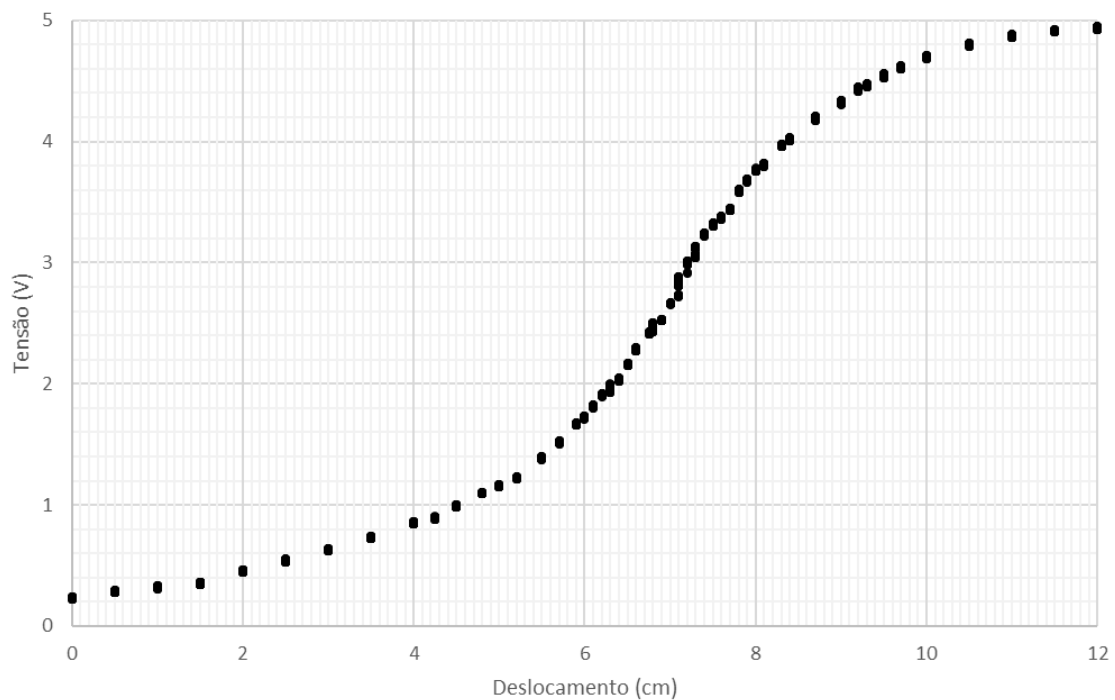


Figura 50 -Caraterística do transdutor de deslocamento produzido.

Analisando a linearidade e sensibilidade nessa zona entre os 60 a 80 mm, encurtou-se a área de análise da caraterística do sensor, como representado no gráfico da Figura 51.

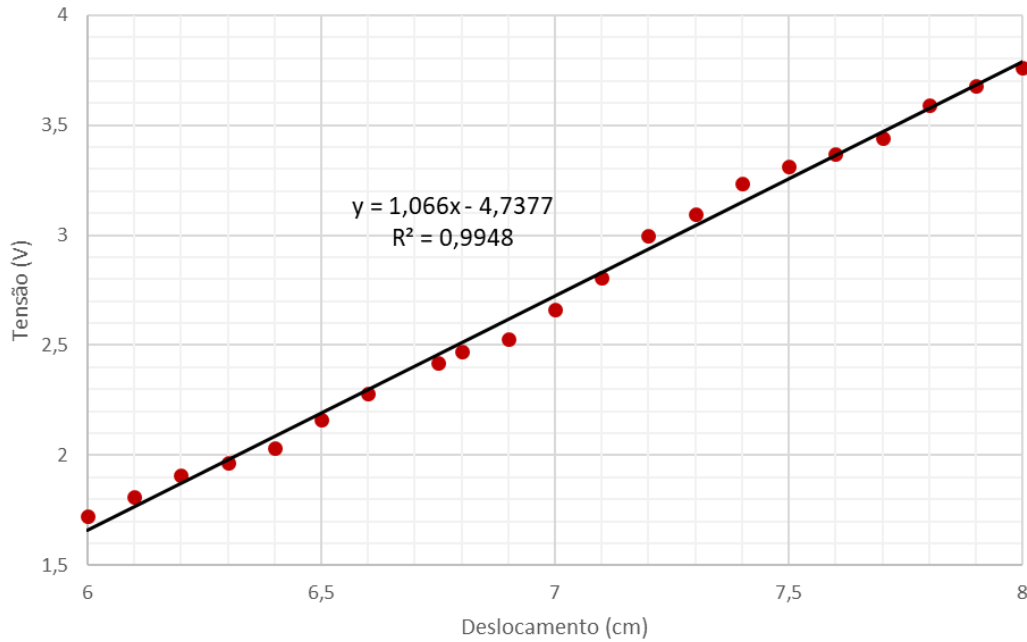


Figura 51- Caraterística do sensor aproximadamente linear para uma zona de funcionamento entre os 60 a 80 mm.

Observa-se uma sensibilidade de 1,066 V/cm, ou 0,1066 V/mm. Sendo que a resolução de uma placa de desenvolvimento, de 10 bit, numa gama de 0 a 5V, é $5/1024 = 4,88 \text{ mV}$, a resolução do transdutor, em conjunto com a placa de desenvolvimento utilizada, nesta zona de funcionamento, será $0,00488/0,1066 = 0,046 \text{ mm}$.

Um transdutor com caraterística linear para toda a sua gama de funcionamento, de 100 mm, possuiria uma sensibilidade de $5/100 = 0,05 \text{ V/mm}$, que corresponderia, em conjunto com uma placa de desenvolvimento igual, a uma resolução de $0,00488/0,05 = 0,098 \text{ mm}$, aproximadamente o dobro do transdutor de fotorresistências.

Por outro lado, a não-linearidade, na zona central do transdutor, é dada por:

$$\frac{\text{Max } |\text{erro}|}{\text{gama}} \times 100$$

Recorrendo a tabelas do *Excel*, obteve-se:

$$\frac{0,09}{2,13} = 4,23\%$$

Uma vez que será utilizado com uma placa de desenvolvimento, é possível utilizar uma função de conversão do valor lido para um valor de deslocamento. Assim, invertendo os eixos é possível obter o gráfico da Figura 52 e utilizar uma aproximação polinomial para retirar uma equação que permite converter o valor analógico lido pela placa de desenvolvimento no valor da medição. Utilizou-se Octave-4.2.1 para calcular a aproximação e obteve-se a seguinte função:

$$Y_{\text{posição}}(x) = 3,8664 \times 10^{-8} \times x^3 - 6,5397 \times 10^{-5} \times x^2 + 3,9211 \times 10^{-2} \times x - 1,2131$$

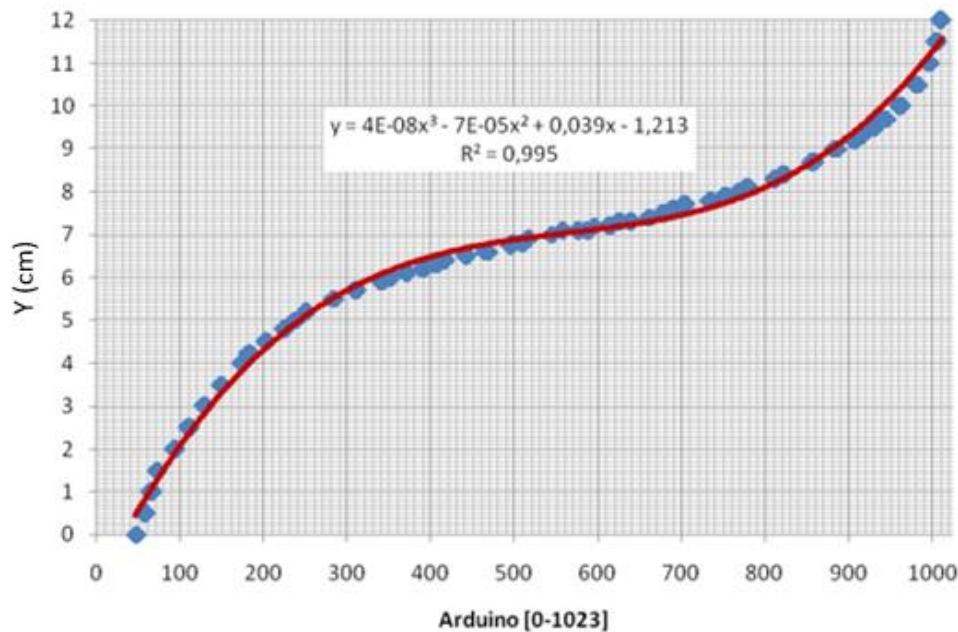


Figura 52 - Gráfico da medição função do valor lido pela placa de desenvolvimento. A equação característica foi aproximada a uma equação polinomial de 3º grau.

Quanto à repetibilidade, algum ruído do sensor prejudica este parâmetro de avaliação. A introdução de um filtro digital ou analógico permite diminuir o ruído a troco de atraso na medição.

As resistências são componentes cujo comportamento é dependente da temperatura, sendo de prever que a temperatura das fotorresistências aumente, especialmente devido aos LED. Ao longo dos testes, que tiveram durações de cerca de 30 minutos, não foram verificadas variações nas medições. Para durações mais longas é desconhecido se serão, efetivamente, verificados efeitos da temperatura.

Finalmente, analisando o custo deste transdutor, este teve um valor de 90,20 €, com o preço de cada elemento mostrado na Tabela 11. Uma vez que algum material já estava disponível no local de trabalho, o custo do material de construção foi estimado em vez de ser um valor real. Não contabilizando o custo de mão de obra, trata-se de uma poupança significativa no que diz respeito a outros transdutores concorrentes.

Em retrospectiva, seria possível diminuir o custo utilizando fotorresistências de maior dimensão, sendo que o prejuízo seria principalmente na linearidade do transdutor, que, como se viu, não é uma propriedade relevante no transdutor desenvolvido.

Por outro lado, foi confirmado, durante a montagem, que as fotorresistências têm comportamentos diferentes entre elas: nas mesmas condições de iluminação foram verificadas diferenças de resistência não desprezável, até 5 a 10% de diferença. Uma redução excessiva do número de resistências poderá deslocar a zona de sensibilidade maior do transdutor para uma das extremidades devido à pouca homogeneidade das fotorresistências que se sobrepõe ao comportamento da luz ou sombra no interior do transdutor.

Tabela 11 - Lista de preços das componentes do sensor de posição.

Componente	Preço
Fotorresistências	60 €
Caixa Preta	4,20 €
LEDs	15 €
Outras componentes elétricas (fios, ficha D9, condensador, resistência)	1 €
Estimativa material de construção (madeira, tinta, difusor, mangas termoretráteis, solda, placa de circuito de impressão)	10 €
Total:	90,20€

4.4. Célula de Carga

Existem vários pontos onde pode existir interesse de controlar a tensão, nomeadamente, no enrolamento e junto ao banho de resina onde a fibra é impregnada. O controlo de tensão é realizado após desenrolamento e é previsto que, devido a efeitos de atrito, a tensão da fibra aumente ao longo do processo.

As células de carga são, por norma, baratas e é possível comprar com variados formatos possibilitando implementação em muitas situações distintas. O bloco de impregnação é muito compacto e possui pouco espaço onde possa ser montado uma célula de carga, sendo a solução mais adequada substituir os rolos por onde a fibra circula por uma célula de carga especial para medição de tensão. A Figura 53, indica os locais onde seria pertinente medir a tensão da fibra com uma célula de carga. A seta amarela aponta para o último rolo antes do banho de resina, e a seta vermelha o ultimo rolo antes da fibra enrolar no tambor.

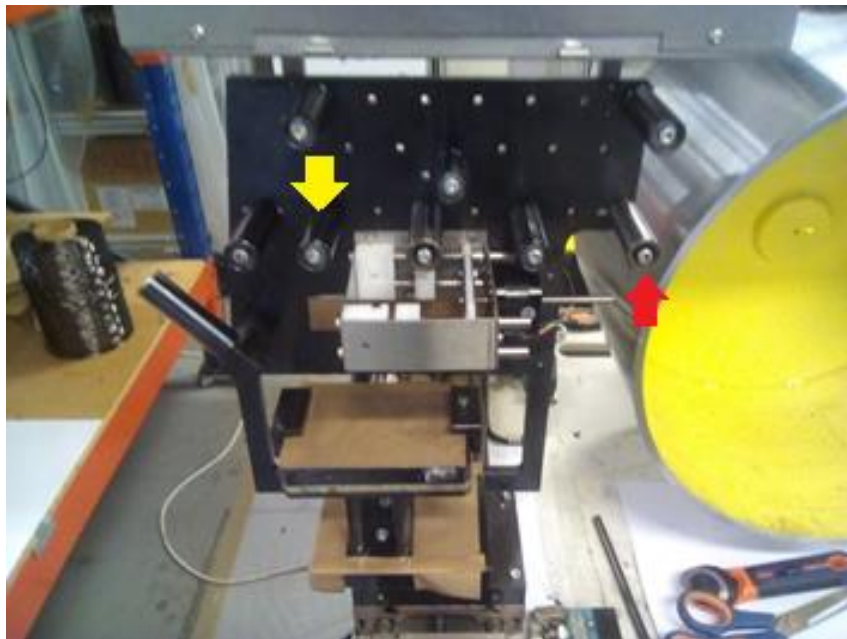


Figura 53 - Indicação dos locais onde interessa medir a tensão da fibra.

Uma possibilidade é a célula de carga que mede a força radial aplicada, da Honigmann, modelo RFS 150/20K/10/3/0 com rolo de alumínio [41], visível na Figura 54, e respetiva eletrónica necessária. Este tipo de célula é possível montar com fixação em apenas um dos lados.



Figura 54 - Rolo e célula de carga radial para medição de tensão da Honigmann [42].

O orçamento deste equipamento pode ser consultado na tabela seguinte.

Tabela 12 - Orçamento do equipamento necessário para medir a tensão da fibra.

Componente	Preço
Célula de carga radial	553 €
Rolo de alumínio	168 €
Amplificador de sinal	328 €
Total:	1049€

Células de carga mais baratas necessitariam de uma estrutura física mais complexa que, por questões dimensionais, não seriam adequadas.

Esta célula de carga poderia ser usada como transdutor para feedback da tensão da fibra para controlar, por exemplo, a pressão do *dancer* ou controlar diretamente o funcionamento do motor, se não existisse o *dancer*. Estas duas hipóteses não são concretizadas na solução proposta para controlo de tensão. O controlo de pressão é realizado manualmente e será o controlo de posição do *dancer* que controlará o funcionamento do motor. Como se pretende uma solução de baixo custo é mais adequado dispensar o conhecimento real da tensão uma vez que terá pouco impacto no funcionamento do controlador. Como este foi dimensionado, um correto funcionamento do *dancer* será suficiente para garantir a tensão pretendida.

5. Implementação e Montagem

No sentido de implementar o sistema de forma simples e barata foi utilizada madeira e ferragens comuns na construção da estrutura física. Uma vez que é ainda a versão de teste, não necessita de elementos estruturais de elevada resistência e longevidade, ficando a estrutura definitiva para trabalhos posteriores a este.

Não seria, de todo, viável, para uma maior produção utilizar estes materiais, seria mais adequado utilizar perfis metálicos, rolamentos e peças maquinadas especialmente para esta aplicação. O protótipo partiu de uma ideia inicial e, iterativamente, foram sendo resolvidos os problemas estruturais que foram surgindo.

Este capítulo irá mostrar a estrutura obtida e justificar as escolhas realizadas.

5.1. *Dancer*

A estrutura do *dancer* foi realizada na vertical. Apesar da desvantagem do peso do êmbolo, da haste e da estrutura de fixação do rolo afectarem o funcionamento, se for conhecida a massa destes elementos é possível conhecer a pressão mínima que corresponde à força necessária para elevar ou manter numa posição constante o cilindro.

Para o colocar numa posição horizontal, poderia ser necessário a utilização de elementos de guiamento extra para o sensor de posição e garantir que o elemento do transdutor solidário com o cilindro não encurvava devido ao próprio peso nem entrava em contacto com nenhum outro componente, evitando-se, assim, forças de atrito.

A Figura 55 é uma fotografia dessa estrutura, legendada. Os rolos de entrada e de saída da fibra (b) e o rolo solidário ao cilindro (a) possuem os seus eixos paralelos. A distância entre-eixos dos rolos de entrada e de saída é de 80 mm, correspondente ao diâmetro de um rolo só, e o rolo solidário ao cilindro está equidistante aos outros dois, permitindo, assim, manter o ângulo de contacto da fibra constante e independente da posição do cilindro. É indiferente o sentido da fibra, por isso qualquer um dos rolos identificados por b, pode ser o de entrada, ou o de saída.

Os testes realizados demonstraram a necessidade de um reservatório pneumático, porque apresenta um comportamento ligeiramente irregular para um tubo curto entre a válvula de precisão e o cilindro. Foi utilizada uma solução de recurso, que recorre a um tubo de maior comprimento e que se revelou suficiente para resolver as irregularidades. Foram utilizados cerca de 18 metros de fio, com diâmetro interior de 4 mm, com um volume total de 240 mL, cerca de metade do volume do cilindro.

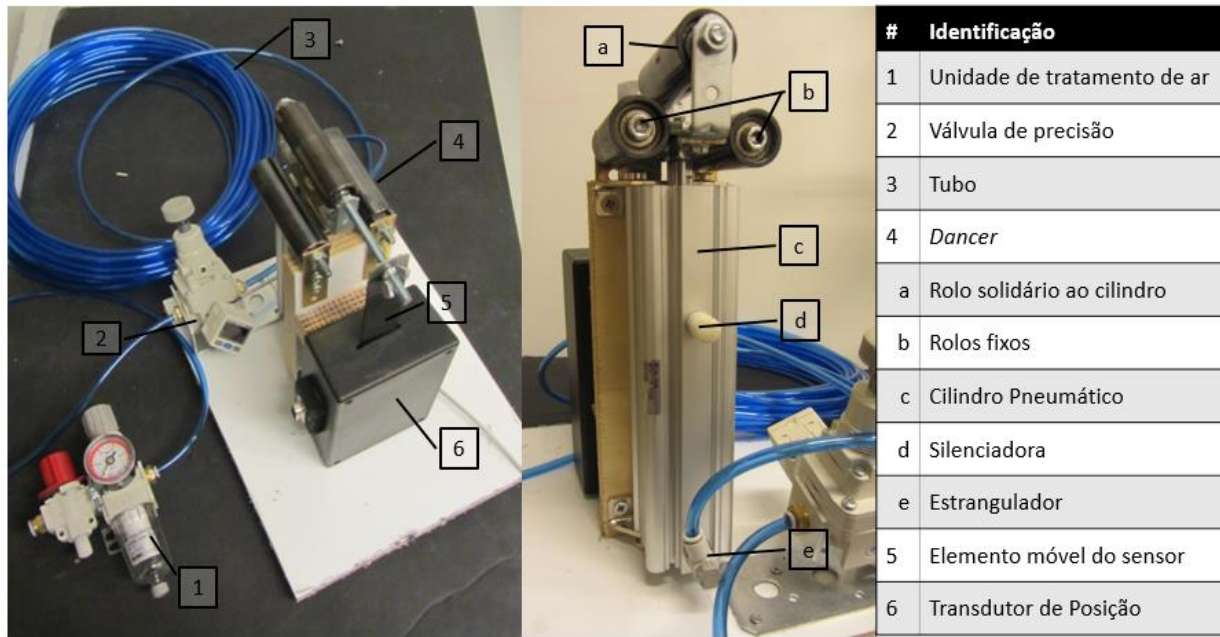


Figura 55 - Fotografias da estrutura completa do *dancer*, que inclui os elementos necessários ao seu funcionamento.

O estrangulador, que regularia o caudal de entrada no cilindro, serve apenas de adaptador para o cilindro. Se fosse controlado o caudal, a pressão no interior do cilindro não seria constante e igual à pressão da válvula de precisão, elemento 2.

Este cilindro possui uma rosca mais específica, de rosca Rc, não muito comum no mercado nacional, que é compatível com o estrangulador utilizado que por motivos de stock do fornecedor, no momento da compra, era o elemento disponível para montar no circuito. Se o estrangulador for completamente aberto, isto é, se não restringir caudal, irá, na prática, funcionar como um adaptador.

Como estes tubos são muito finos, havia um risco de as perdas de carga do ar não permitir uma correta pressão no cilindro. As perdas de carga são função da velocidade do fluido nas tubagens, assim, depois de obter resultados experimentais, foi observado que a velocidade máxima do dancer foi de 0,14 m/s e ocorreu quando se empurrou a fibra na vertical, durante a utilização de uma tensão de 5 N.

O caudal necessário, para o cilindro se mover a 0,14 m/s, é:

$$Q = V \times A = 0,14 \times 490,9 \times 10^{-6} = 7,31 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

E a velocidade linear no tubo será de:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{7,31 \times 10^{-5}}{1,26 \times 10^{-5}} = 5,80 \text{ m/s}$$

Recorrendo à equação de Darcy-Weibach, a queda de pressão é dada por [43]:

$$\frac{\Delta p}{L} = f \times \frac{v^2 \times \rho}{2 \times D}$$

Sendo f o fator de fricção, L o comprimento da tubagem e D o diâmetro, v a velocidade linear do fluido, e ρ a sua massa volúmica.

Como se verá, 5 N corresponde a 32 kPa de pressão relativa na camara do cilindro.

Para esta pressão, com a temperatura a ser considerada de 25°C:

$$\rho = \frac{p}{R \times T} = \frac{132000}{287 \times 298} = \frac{132000}{85526} = 1,54 \text{ kg/m}^3$$

Para determinar o coeficiente de fricção é necessário saber o número de Reynolds deste escoamento:

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} = \frac{1,54 \times 5,80 \times 0,004}{1,85 \times 10^{-5}} = 1931$$

Considerando a viscosidade cinemática do ar, $1,85 \times 10^{-5}$ Pa.s. Este número de Reynolds corresponde a um escoamento na transição entre regime turbulento e laminar, considerando-se assim a pior das hipóteses. Para escoamentos turbulentos em tubos lisos, o coeficiente de fricção pode ser obtido pela equação de Blasius [43]:

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = \frac{0,3164}{1931^{0,25}} = 4,77 \times 10^{-2}$$

Assim:

$$\frac{\Delta p}{L} = 0,0477 \times \frac{5,80^2 \times 1,51}{2 \times 0,004} = 302 \text{ Pa/m}$$

Ou seja, uma queda de pressão de cerca de 0,9 % por metro de tubagem. Para os 18 metros de tubo, a queda de pressão será elevada, cerca de 16,2% do valor pretendido no interior do cilindro. Contudo, este pico de velocidade, e outros que possam ocorrer, duram apenas breves instantes, cerca de 0,07 segundos, que, na prática, não irá ter efeitos na tensão do pré-impregnado.

Para uma situação mais habitual de funcionamento, foi calculada a velocidade média de todas as velocidades calculadas para ter uma ideia do comportamento normal da pressão durante um funcionamento em regime estacionário, o valor foi de 5,95 mm/s. O caudal de fuga de ar no cilindro deverá ser desprezável devido ao toleranciamentos entre peças em contacto do cilindro ser de elevada qualidade para garantir um ajuste quase perfeito e com muito baixo atrito.

Ainda para 5 N,

$$Q = V \times A = 0,00595 \times 490,9 \times 10^{-6} = 2,92 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2,92 \times 10^{-6}}{1,26 \times 10^{-5}} = 0,23 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} = \frac{1,54 \times 0,23 \times 0,004}{1,85 \times 10^{-5}} = 77$$

Desta vez o regime do escoamento é laminar, recorrendo à equação de Hagen-Poiseille, o coeficiente de fricção será [43]:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{77} = 0,83$$

Assim:

$$\Delta p = 0,83 \times \frac{0,23^2 \times 1,51}{2 \times 0,004} = 8,29 \text{ Pa/m}$$

Ou seja, uma queda de pressão de 0,025 % por metro de tubagem que, para 18 m, terá um valor de 0,45% da pressão desejada. Pode-se, assim, considerar a queda de pressão nas tubagens desprezável.

Para conhecer a pressão mínima de funcionamento, foi regulada a pressão na válvula de precisão, de forma muito lenta, até ser possível manter a posição do *dancer* em qualquer ponto do seu curso. Se a pressão fosse demasiado elevada, o cilindro começaria o seu movimento de avanço, se fosse demasiado baixa iniciaria o seu movimento de recuo.

A pressão para que o cilindro fique parado em qualquer posição é 10 kPa, que corresponderá, portanto, a, aproximadamente, 4,9 N de peso no embolo ou 499 g de massa, com aceleração gravítica de $9,81 \text{ ms}^{-1}$. Esta experiência foi repetida com tubo curto e com o tubo longo, e o valor de pressão observado foi o mesmo.

A tensão da fibra será dada, portanto, por:

$$T_{fibra}(p_1) = \frac{1}{2} A_1 \times (p_1 - 10)$$

Ou, com A_1 igual a $490,9 \text{ mm}^2$, p_1 em kPa e T_{fibra} em N:

$$T_{fibra}(p_1) = \frac{0,4909 \times p_1 - 4,909}{2}$$

Como o objetivo é saber a pressão para a tensão de fibra que pretendemos:

$$p_1(T_{fibra}) = \frac{2}{A_1} \times T_{fibra} + 10$$

Ou:

$$p_1(T_{fibra}) = 4,0741 \times T_{fibra} + 10$$

Para uma utilização mais fácil e intuitiva pelo operador foi traçado um gráfico, Figura 56, e uma tabela de correspondência, Tabela 13.

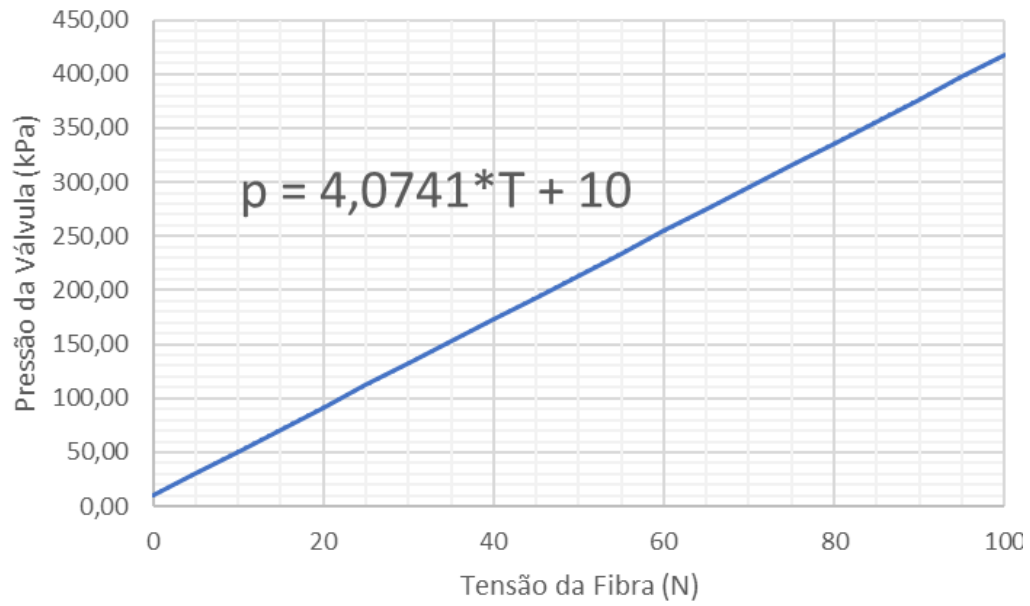


Figura 56 - Gráfico de correspondência de Tensão da Fibra e pressão na válvula de precisão.

Tabela 13 - Correspondência Tensão da Fibra e pressão na válvula de precisão.

Tensão (N)	Pressão (kPa)
0	10,00
5	30,37
10	50,74
15	71,11
20	91,48
25	111,85
30	132,22
35	152,60
40	172,97
45	193,34
50	213,71
55	234,08
60	254,45
65	274,82
70	295,19
75	315,56
80	335,93
85	356,30
90	376,67
95	397,04
100	417,41

5.2. Desenrolador

Como já foi referido, foi decido não ser utilizado o tensionador que funcionava originalmente como desenrolador. É necessário produzir um desenrolador de baixo custo e o existente é caro, e produzindo um novo permite, num futuro próximo, começar a adaptar a máquina para a produção de pré-impregnados híbridos e alimentados por mais do que uma bobine de fibra. Assim, foi dimensionado, selecionados os componentes e montado um desenrolador completamente novo.

A estrutura do desenrolador está retratada na fotografia da Figura 57. O veio do desenrolador não deve transmitir elevadas cargas radiais ao redutor, a fim de evitar danificá-lo. Para diminuir esses esforços radiais, neste protótipo, o veio roda apoiado em dois furos concêntricos em duas tábuas paralelas. Para garantir a transmissão de movimento do veio para as bobinas de matéria prima, foram utilizados perfis metálicos e parafusos que fixam a bobina. Apesar da baixa precisão dos furos das placas paralelas e dificuldades em garantir a concentricidade, não é preocupante pequenos erros já que o *dancer* irá absorver as oscilações que possam ocorrer.

A maior desvantagem desta estrutura de madeira é sua baixa massa. Foram usadas borrachas por baixo da base para aumentar o atrito com o solo, mas perante tensões superiores a estrutura podia começar a mover-se. Foram utilizados halteres para aumentar o peso e estabilidade da estrutura.

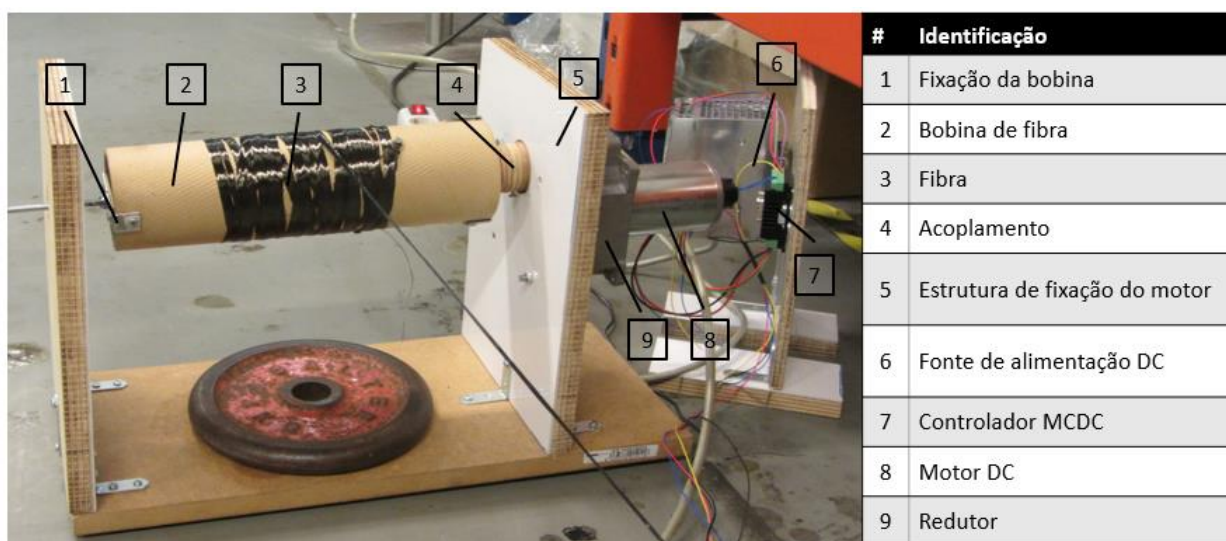


Figura 57 - Fotografia do desenrolador com legenda.

Por outro lado, a estrutura suportada em duas tábuas com a fixação usada torna difícil a operação de substituição das bobinas de fibra. Para trabalho futuro é proposto uma estrutura semelhante à do desenrolador antigo da máquina, em que o eixo de movimento está montado em apenas uma parede. É possível diminuir o esforço radial do motor, se a parede da estrutura for suficientemente grossa com rolamentos que suportem as cargas radiais. Em contrapartida, é necessário cuidado especial com a flecha do veio e com um binário de cerca de 50 Nm, valor

relativamente elevado, respetivo a uma tensão de fibra de 100 N na extremidade de um veio de 50 cm.

Os componentes eletrónicos foram, inicialmente, montados numa estrutura à parte, para facilitar o manuseamento de cablagens e estudar o funcionamento dos equipamentos durante os testes. A estrutura final precisará dos dois elementos fixos, para evitar desconexões de cabos ou outros acidentes que impeçam o correto funcionamento do desenrolador.

5.3. Eletrónica

A parte eletrónica do sistema é composta por três unidades principais: a fonte de tensão DC, que fornece corrente contínua de 24 V ao sistema, necessária para acionamento do motor e útil para outras funções de outras componentes do sistema, o *driver* do motor DC que controla o motor do desenrolador à velocidade pretendida e uma caixa de controlo. A seguinte figura distingue cada um desses elementos e identifica as ligações necessárias entre componentes.

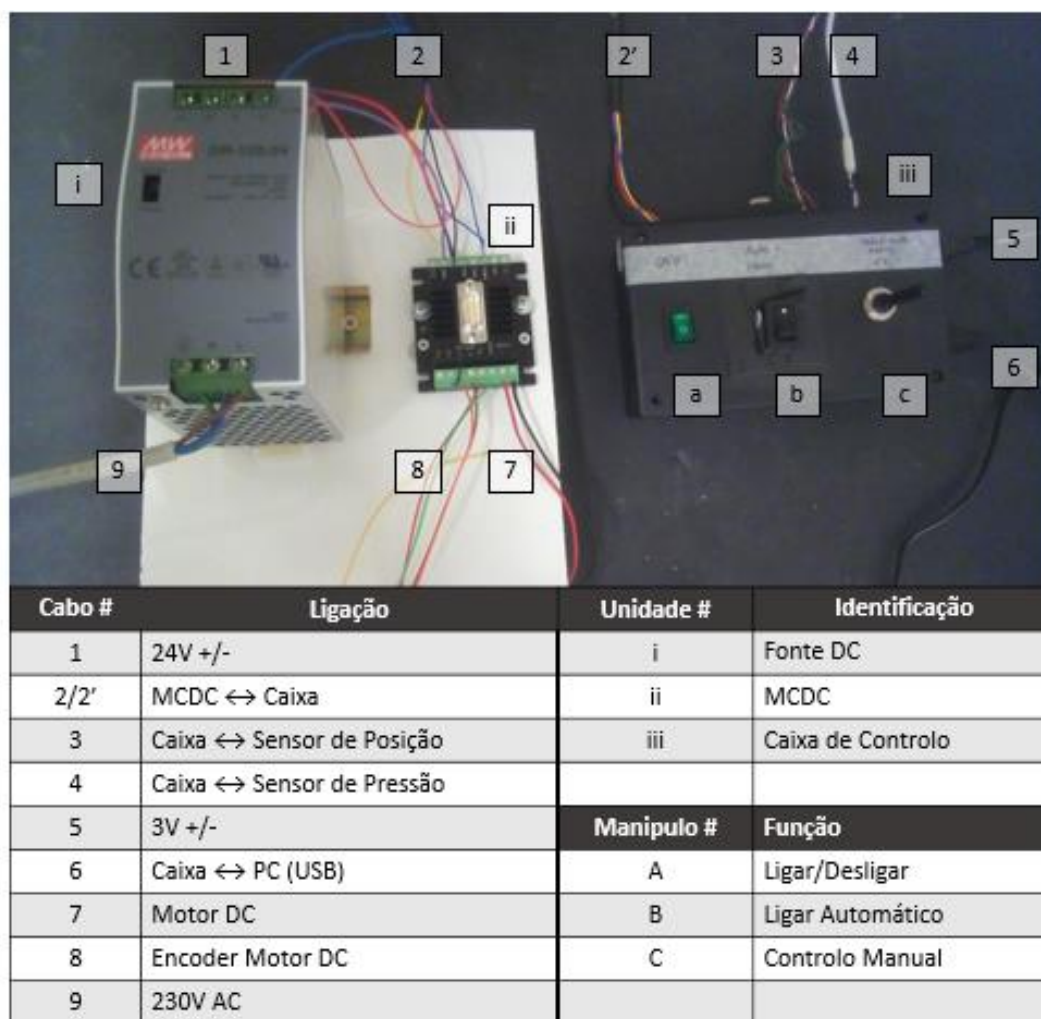


Figura 58 - Fotografia dos elementos da eletrónica do sistema desenvolvido.

A caixa de controlo possui uma placa de desenvolvimento de fornecedor descaracterizado modelo MEGA 260, pois usa um microprocessador ATMEGA2560 da ATMEL, tendo as mesmas características do que uma placa de desenvolvimento de fabricantes concorrenciais como Arduino ou Velleman. Além da placa de desenvolvimento, tem uma placa para circuito impresso com ligações de vários fios e cabos para centralizar as ligações necessárias ao controlo do sistema.

O seguinte diagrama indica a comunicação existente entre componentes eletrónicos do sistema:

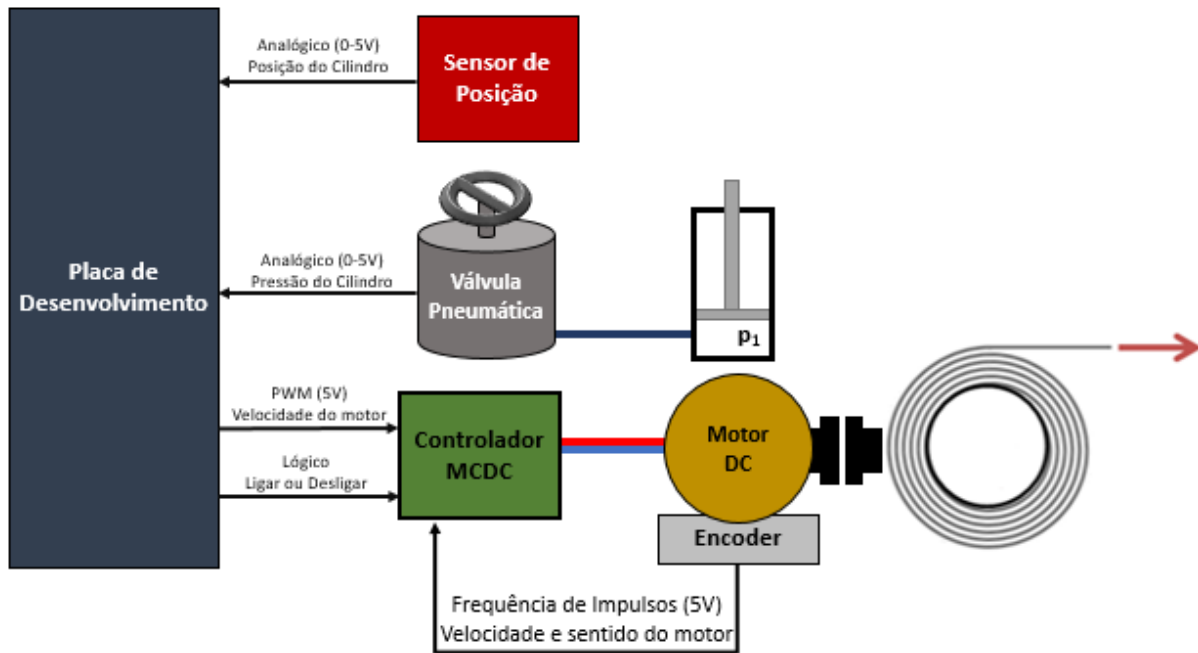


Figura 59 - Diagrama das comunicações existentes no sistema.

Na tampa da caixa estão montados três manípulos, dois deles interruptores de atuação alternada e um potenciômetro.

O interruptor para ligar e desligar o motor, na verdade, apenas, ativa ou desativa, através de uma porta lógica do *driver* do motor. O outro interruptor, de contactos inversores, permite alternar entre o funcionamento automático do sistema, como ele irá funcionar normalmente, e um modo manual. Na prática altera qual é o sinal de entrada fornecido à placa de desenvolvimento. Na posição automática, envia o sinal de posição do transdutor do *dancer*, caso contrário envia o sinal do potenciômetro da caixa.

O potenciômetro permite fazer um sinal de 0 a 5V para a placa de desenvolvimento. Na fase de teste, foi utilizado como simulador de erro do sensor, permitindo, assim, também, comandar, de forma grosseira, o funcionamento do motor para enrolar ou desenrolar fibra, a menor ou maior velocidade. Futuramente, são necessárias algumas adaptações simples para comandar manualmente a velocidade do motor, que pode, por exemplo, ser usado para operações de manutenção.

O *driver* da Faulhaber controla o movimento do motor DC. Pode funcionar autonomamente, ligado a um computador ou fornecendo referência de velocidade, analógica ou digitalmente. Deve ser ligado a um computador por uma porta RS-232, para ser configurado, programado e, se for pretendido, para controlar o motor ou monitorizar o seu funcionamento.

Comunicação de dados em série consiste em comunicação através de bits, sinais binários, enviados um de cada vez, ao contrario de comunicação em paralelo que envia todo o conjunto de bits que constituem uma dada palavra de uma vez só. O recetor da mensagem de dados faz a montagem dos bits, forma as palavras e compreende os dados recebidos.

RS232 é um protocolo de comunicação em série, que permite que os dois pontos de comunicação se compreendam entre si, estabelecendo normas e indicações para uma correta transmissão de mensagens e dados. Para uma comunicação correta é essencial que os dois aparelhos estejam configurados coerentemente quanto a: Baud rate, ou número de bits por segundo; o número de bits que compõem cada palavra; a paridade, uma espécie de verificação se a mensagem foi bem passada e os bits de paragem, que indicam que a palavra acabou.

Neste protocolo, o 0 ou 1 correspondente ao bit que se está a ler depende da polaridade, de -15 a 15V, fora uma zona morta para evitar efeitos de ruído, em relação a um contacto neutro comum aos dois pontos em comunicação. Assim cada ponto de comunicação tem pelo menos um canal de leitura, um de envio e um neutro.

O tipo de conector, normalmente, usado é o D9, igual ao utilizado no transdutor de posição implementado, vista na Figura 48, da página 53. Geralmente as portas D9 macho são usadas em DTE, ou terminais capazes de enviar, ler e manipular dados e as portas D9 fêmea usadas em DCE, que servem de interface entre DTE e o meio de comunicação. A seguinte tabela indica a designação habitual de cada pino e respetiva função [44], [45].

Tabela 14 - Designação e função dos pinos de uma tomada D9 numa ligação em série RS232 [44], [45].

# Pino	Designação	Função
1	DCD – Data Carrier Detect	Indicação do Modem que ligou a outro Modem remoto
2	RD – Receive Data	DTE recebe dados
3	TD – Transmit Data	DTE envia dados
4	DTR – Data Terminal Ready	Indicação do DTE que está operacional
5	GND – Signal Ground	Indica a referência nula entre os dois pontos de comunicação
6	DSR – Data Set Ready	Indicação do DCE que está operacional
7	RTS – Request to Send	Indicação do DTE que quer fazer ligação
8	CTS – Clear to Send	Indicação do DCE que pode fazer ligação
9	RI – Ring Indicator	Indicação do Modem de chamada telefónica na linha

Os pinos 1 e 9 estão relacionados com uma das versatilidades do protocolo RS232, pois permite ao ligar a um modem, um tipo de DCE, transmitir dados via linha telefónica, mas não são pertinentes, nesta aplicação em específico.

Neste caso existem dois terminais de dados DTE, ou seja, uma extensão normal de RS232 não irá permitir a comunicação, já que o pino de transmissão de dados de um terminal não irá coincidir com o pino de receção do outro terminal. É preciso que um elemento seja capaz de fazer a interface entre os dois, esse elemento é normalmente um *null modem*.

Segundo os manuais de instruções do controlador MCDC, seria suficiente um *null modem* simples com apenas três contatos ligados, o neutro e os dois de transmissão de dados. Não foi possível configurar desse modo o motor, devido a uma incompatibilidade. Foi utilizado um adaptador USB-RS232c para ligar o cabo ao computador, que, devido ao seu modo de funcionamento, não permitiu a comunicação com o *null-modem* mais simples.

Assim foi construído um *Partial Handshaking null-modem* com a correspondência de pinos de terminais descrita na Tabela 15.

Tabela 15 - Correspondência de pinos entre dois terminais ligados por um Partial Hand-shaking Null Modem [46].

Terminal 1	Terminal 2	Ligação
1	7 e 8	RTS2 → CTS2 + DCD1
2	3	RD1 ← TD2
3	2	TD1 → RD2
4	6	DTR → DSR
5	5	GND
6	4	DSR ← DTR
7 e 8	1	RTS1 → CTS1 + DCD2

Este tipo de *null modem* permite o *handshaking*, isto é, utiliza-se os pinos 4, 6, 7 e 8 para verificar possibilidade de comunicação aumentando a velocidade de transmissão de dados, e é compatível com a maior parte das comunicações série RS-232. O aviso de que a linha está pronta para ser usada para comunicar dados é dado pelo próprio terminal, pois o RTS e o CTS estão ligados entre si, não tendo por isso função prática, exceto se o outro terminal verificar o DCD, que é uma situação muito específica e pouco comum, uma vez que se viu que o pino 1 tem funções ligadas à rede telefónica. A ligação cruzada dos pinos de DSR e DTR comunicam entre os dois equipamentos que encontram ligados, e a mensagem só é trocada se ambos os sinais forem afirmativos [46].

As fichas técnicas dão conta que a conexão D9 do controlador MCDC só possui as três ligações mais importantes, RD, TD e GND. A razão, por confirmar, deverá ser, portanto, uma questão de funcionamento do adaptador utilizado que necessita das funções de *handshaking* para permitir uma correta ligação

Após configurar a conexão entre o controlador e um computador, é possível programar e configurar o controlador, através da interface gráfica do programa Motion Manager 6 e foi necessário informar o programa de todos os equipamentos utilizados, fornecendo dados técnicos

sobre o motor, o redutor e o *encoder*. Com base nesta informação, o programa, automaticamente, calcula os seus parâmetros internos e de controlo do motor.

O controlador calcula a velocidade do motor com base nos impulsos do *encoder* incremental. Isto é, por cada volta completa do rotor do motor, o *encoder* envia um certo número de impulsos digitais para o controlador. O número de impulsos por rotação do motor é um dos dados fornecidos mencionados, mas, mesmo em coerência com as informações prestadas pelas fichas técnicas e manuais dos equipamentos, a velocidade do motor, apesar da interface gráfica indicar que sim, não tendia para a velocidade pretendida, o que revelava erros nos parâmetros. Para corrigir esta situação, foram ajustados manualmente alguns parâmetros até o correto funcionamento.

Esse erro pode ter vários motivos. A velocidade que estava a ser medida, através da contagem de rotações, durante um certo período de tempo, era a velocidade do veio do redutor. A velocidade que é controlada pelo *driver* é a velocidade do veio do motor. O *software* fornecido apenas permite seleccionar valores interiores de redução e, neste caso, o valor teve de ser arredondado.

Por outro lado, os parâmetros programados automaticamente pelo *software* são otimizados para os motores da Faulhaber. Apesar deste ser o recomendado pelo fornecedor, não são do mesmo fabricante. Assim, em vez de apenas seleccionar o modelo entre os disponíveis, é necessário indicar todos os dados técnicos do motor, alguns deles presentes nas fichas técnicas disponíveis, outros não. Alguns, tiveram de ser calculados ou adaptados de modelos de motor semelhantes.

Estes e outros possíveis problemas deram origem a erros na gama das 15 rpm, para um movimento a 20 rpm, que corresponde a 75% de erro.

Os parâmetros foram ajustados de forma iterativa, até a velocidade programada corresponder corretamente ao número de rotações por minuto do veio do redutor. Se o objetivo do trabalho fosse o controlo de velocidade, este passo era fulcral e teria de ser feito com grandes cuidados e com elevada precisão. Neste caso, a velocidade do desenrolador, na realidade, não é importante. O controlador do sistema irá ajustar o funcionamento do motor até este funcionar ao binário que permita a tensão de fibra pretendida, independentemente dessa velocidade estar a ser calculada corretamente ou não.

O Motion Manager 6 permite muitas outras funções. É possível, por exemplo, acrescentar mais funções lógicas e, se fosse pretendido, utilizar o algoritmo de controlo implementado na Placa de Desenvolvimento, com as devidas adaptações, para controlar a posição do *dancer*. Não é do interesse desta aplicação centralizar o controlo de todo o sistema, no próprio controlador do motor. Isso poderia levar a um funcionamento mais lento do controlador cuja prioridade é otimizar a dinâmica do motor e componentes associadas, que é importante para garantir um bom controlo da tensão da fibra. Ocupar o processamento do *driver*, que aumentaria o tempo de ciclo, com todas as funções necessárias para o controlo de posição do *dancer* poderia comprometer o controlo do motor.

Uma vez que se utiliza uma placa de desenvolvimento, a indicação da velocidade pretendida para motor deve ser fornecida por via de input analógico ou PWM. Nestas ultimas, é ainda possível realizar esse *input* de 0 a 5 V ou de 0 a 24 V.

A frequência de amostragem da porta de *input* analógico do controlador é de 10 kHz, e a frequência do PWM da placa de desenvolvimento é de, no máximo, 62,5 kHz, que, apesar de ser superior, estão na mesma ordem de grandeza.

Já que estas placas fornecem sinais analógicos apenas em PWM, é mais adequada a hipótese de input em PWM, pois uma filtragem do sinal analógico iria introduzir atraso na dinâmica do sistema.

Foram testadas as hipóteses de PWM a 5V e a 24V. O sistema de 5 V é de mais simples implementação, mas o sistema programado para 24 V, seria de muito fácil substituição, não sendo necessário reprogramar o controlador do motor para implementar, futuramente, por exemplo, um PLC para oferecer mais robustez ao sistema, mas um dos principais benefícios poderia ser a maior resistência a ruído.

A placa de desenvolvimento funciona de 0 a 5V, mas é possível através de sistemas eletrónicos transformar esse sinal para 24V. A opção escolhida para teste foi com um optoisolador com fototransistor. Consiste num circuito integrado composto por um LED de infravermelhos e um transístor, assim os dois circuitos estão desacoplados e isolados eletricamente, e um sinal PWM de, por exemplo, 5 V, corresponderia a um sinal PWM com o mesmo *duty cycle*, mas de 24 V ou outra qualquer tensão a que estivesse ligado o transístor.

Um circuito integrado possível de utilizar seria, por exemplo o TIL111 da Fairchild. Esta solução pode ser observada na Figura 60.

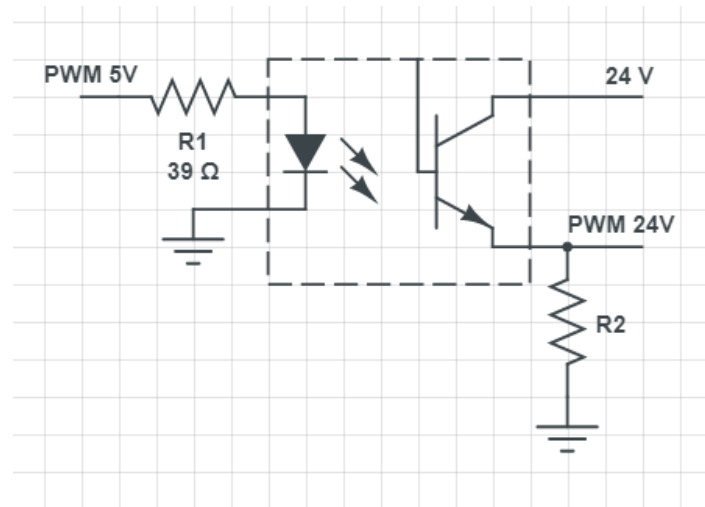


Figura 60 - Diagrama de um circuito possível para produzir um sinal pwm de 24V para controlo da velocidade. Circuito integrado TIL111 da Fairchild dentro do quadrado a traço interrompido.

A tensão adequada para o LED deste circuito é de 1,2V com 100 mA de intensidade de corrente, o que faz com que, com um PWM, originalmente, de 5V, necessite de uma resistência em série.

A queda de tensão nessa resistência terá de ser de 3,8 V, o que, para uma intensidade de corrente de 0,1 A, faz com que a resistência seja:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3,8}{0,1} = 38 \, \Omega$$

$$P = VI = 3,8 \times 0,1 = 0,380 \, W$$

Assim, poderá usar-se uma resistência comum de 0,5 W e 39 Ω , que são os valores padrão de resistências mais aproximadas.

O sistema funcionou de igual modo para os dois sistemas, sem diferenças observadas notórias no que diz respeito ao ruído. Apesar de futuramente poder ter vantagens, não está previsto a utilização de um PLC ou outro sistema de 24 V. A preparação para essa eventualidade necessitaria de componentes eletrônicas sujeitos a desgaste que, no futuro, podem necessitar de substituição. Assim, pela simplicidade da implementação foi optado pela solução de PWM a 5 V.

5.4. Programação

Foi necessário escrever um programa para a placa de desenvolvimento e um programa para o controlador MCDC3006, o *driver* do motor DC.

O programa da placa de desenvolvimento (Anexo A) foi desenvolvido no programa *open-source Arduino*, e o seguinte fluxograma indica os passos de cada ciclo, que têm uma duração média de cerca de 0,03 segundos.

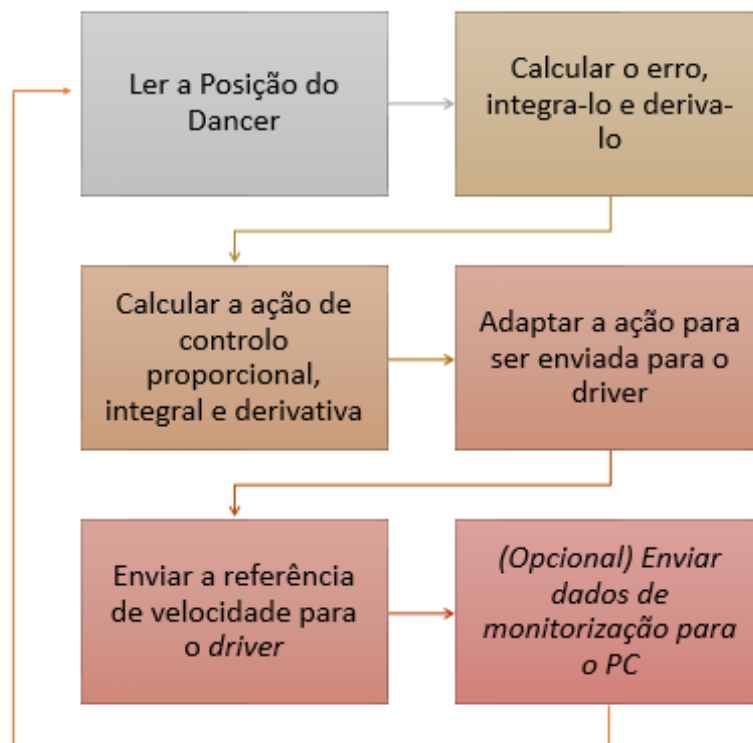


Figura 61 - Fluxograma do algoritmo de controlo PID de posição do Dancer.

É utilizado um filtro passa-baixo digital para reduzir o ruído do transdutor na medição da porta analógica respetiva. É feita uma média de 200 leituras da porta analógica que será uma melhor aproximação ao real valor sem o ruído. Foram escolhidas 200 medições, experimentalmente, para manter um compromisso de baixo ruído sem induzir atraso significativo no controlo.

O erro é apenas a diferença entre o valor medido e o valor de referência. A referência escolhida é constante e igual a 600, correspondente a uma posição dentro da área de maior sensibilidade do sensor, sensivelmente a meio do curso do cilindro pneumático. O integral do erro é calculado somando, todos os ciclos, o valor anterior do integral ao produto do erro desse mesmo ciclo pelo tempo de ciclo. A derivada do erro é a divisão da variação do erro desde o último ciclo pelo tempo de ciclo.

A ação de controlo é calculada multiplicando o erro, o seu integral e a sua derivada, respetivamente, pelas constantes de ganho proporcional, integral e derivativo e somando cada um desses produtos. Este resultado é então somado a 127, o valor que corresponde ao motor parado, um *duty cycle* do PWM igual a 50%.

Um erro positivo de posição indica que a fibra estará a tender para uma tensão inferior à desejada, provocando uma rotação do motor no sentido contrário à da fibra ou a uma velocidade menor. Um erro negativo significa que a tensão da fibra tenderá a aumentar, e, assim, o motor rodará a uma velocidade superior, no mesmo sentido de alimentação da fibra.

Caso a ação de controlo tente provocar uma velocidade superior à máxima, em qualquer uma das direções, uma função condicional saturará a referência de velocidade, para valores superiores a 255 ou inferiores a 0. Caso fosse enviado uma referência fora desse intervalo de valores, o *duty cycle* iria inicializar no extremo oposto da escala. Por exemplo, para o valor 256, o *duty cycle* iria corresponder ao valor 0% que é a referência da velocidade máxima, no sentido oposto ao necessário, perdendo a capacidade de controlo do sistema.

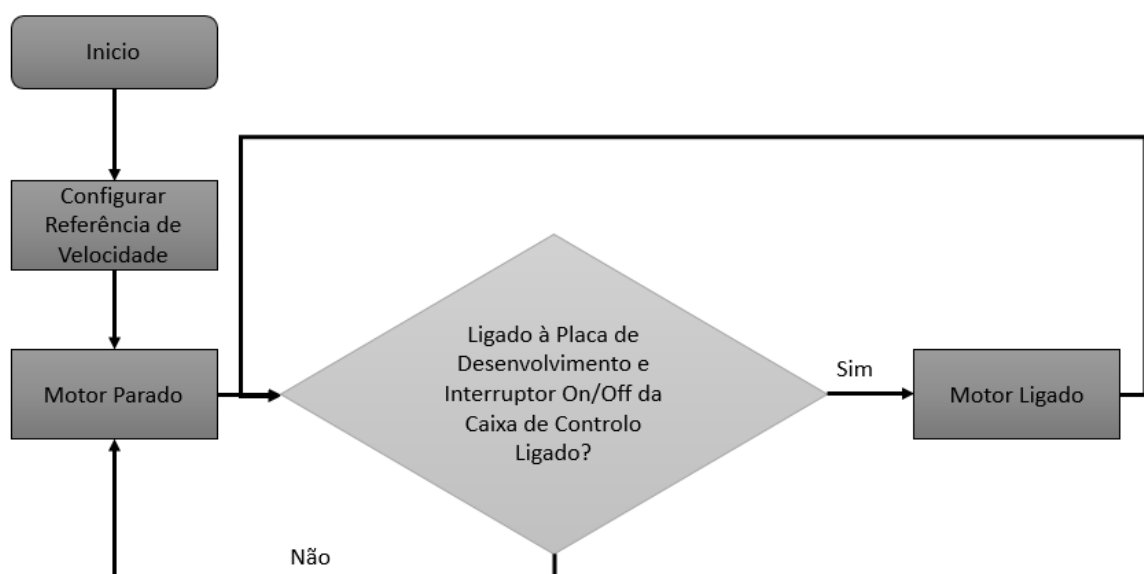


Figura 62 - Fluxograma do algoritmo de funcionamento do *driver* do motor

O programa para o *driver* (Anexo B), representado graficamente na Figura 62, é apenas para garantir que o motor não funciona sem ser pretendido ou se a placa de desenvolvimento não estiver ligada ou conectada.

Se a placa de desenvolvimento estiver desligada o *duty cycle* lido pelo MCDC será 0 e começará a rodar à velocidade máxima, sendo por isso pouco prático do ponto de vista do utilizador, ter de desligar o motor manualmente, e até perigoso não ser salvaguardada a sua paragem se não estiver a ser dado nenhum comando. Para isso o motor só irá ser ativado se uma das portas lógicas do controlador estiver atuada a 5V, fornecidos pela placa de desenvolvimento, e com o interruptor (a) da Figura 59 da página 66 na posição de contato fechado. Ficará nesse estado até à porta lógica voltar a 0 e desativar o motor.

5.5. Estrutura final

Como foi dito a estrutura em madeira é demasiado leve, tendo sido utilizados halteres para impedir o movimento das componentes quando separadas. Depois de verificar o correto funcionamento de cada um dos elementos deste sistema, foram todos montados numa palete para ser fácil de transportar e manterem-se fixos durante o funcionamento, como pode ser visto na Figura 63

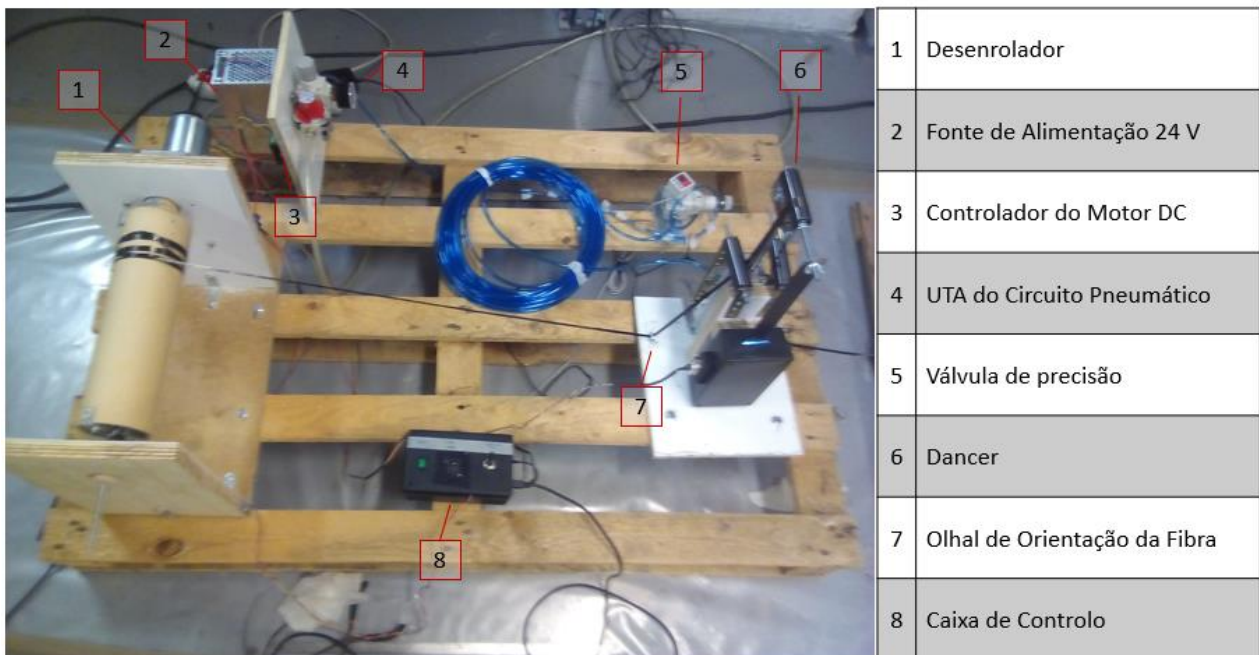


Figura 63 - Fotografia legendada da estrutura final do sistema de controlo de tensão da fibra.

Foram acrescentados olhais para guiar a fibra em direção aos rolos do *dancer*. Caso contrário, a fibra poderia desmontar-se dos rolos à medida que iria sendo consumida, deixando o sistema incontrolável.

6. Resultados Experimentais

Neste capítulo serão testados alguns componentes do sistema. Em primeiro lugar, será comprovado o funcionamento do *dancer*, provando que a pressão configurada na válvula de precisão irá corresponder à tensão de fibra desejada. Serão, também, testados vários controladores para escolher o mais adequado a este sistema.

Nos testes ao controlador serão, numa primeira etapa, utilizados controladores P, PI e PID, a diferentes velocidades e tensões de fibra e, dependendo dos resultados, serão ajustados os parâmetros ou adicionadas funções ao controlador.

6.1. Medição de Tensão

O sistema desenvolvido controla a tensão da fibra através do controlo de posição de um cilindro pneumático, não sendo preciso para o seu funcionamento medição contínua da tensão da fibra. Para comprovar o seu funcionamento, foi construída uma estrutura, visível na Figura 64, composta por roldanas e um dinamómetro que mede a força exercida numa das roldanas pelas fibras.



Figura 64 - Estrutura utilizada para medir a tensão da fibra.

Uma vez que a posição das três roldanas é fixa e conhecida, é possível converter a leitura do dinamómetro para a tensão da fibra através de cálculo trigonométrico. A distância entre as duas roldanas é de 39 cm, e a roldana do dinamómetro está equidistante às duas e a uma altura de 16 cm.

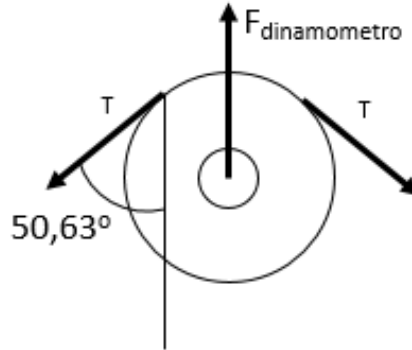


Figura 65 - Diagrama de corpo livre da roldana montada no dinamómetro.

Olhando ao diagrama de corpo livre da Figura 65, a tensão da fibra deverá ser dada por:

$$T = \frac{F_{dinamómetro}}{2 \times \cos(50,63^\circ)}$$

Foram realizadas as medições durante os testes de controladores, que eram feitos a 5 N e 50 N, os dados obtidos estão na seguinte tabela

Tabela 16 - Medições de tensão durante os testes do controlador.

Pressão [kPa]	Tensão Pretendida [N]	Tensão Medida (0 rpm) [N]	Tensão Medida (1 rpm) [N]	Tensão Medida (3 rpm) [N]
31	5	4,7	7,1	8,7
214	50	49,1	53,4	55,0

Os resultados da tensão foram independentes do controlador utilizado. Uma vez que a tensão aumenta em movimento e para maiores velocidades, verifica-se a existência de atritos nos elementos de contacto com a fibra.

Para corrigir este erro, de elevado impacto, especialmente, para baixas tensões, com um erro de 74% para 5N a 3 rpm, deve-se substituir as peças em contacto, como os rolos do dancet, as roldanas e os olhais de alinhamento, por equivalentes de menor atrito, por exemplo de teflon.

Uma vez que a tensão medida se mantém constante durante o funcionamento à mesma velocidade e repete-se, fora pequenas variações, para as mesmas condições de funcionamento, deverá ser possível, com um estudo mais alargado, aproximar a pressão a uma função da tensão pretendida e da velocidade a que irá ser produzido o pré-impregnado. Tabelar a pressão em função

da velocidade e tensão seria inconveniente se a velocidade de impregnação fosse variável, mas, é uma opção viável, uma vez que, em princípio, para manter a homogeneidade do pré-impregnado fabricado, a velocidade de impregnação deverá ser constante. Requer, contudo, um conjunto de testes muito mais extensivo do que aqueles que foi possível realizar neste contexto.

Se, futuramente, este desenrolador tiver de ser adaptado para a utilização a velocidades variáveis será necessário introduzir uma célula de carga ou um dinamómetro com uma saída digital e uma eletroválvula, equipamentos que aumentariam o custo do projeto em algumas centenas de euros.

6.2. Controlador

Foram testados vários tipos de controlador no sistema. Foi estabelecido um processo simples para comparar os controladores para escolher o mais interessante para esta aplicação. Cada controlador testado passará por seis modos de funcionamento, fruto da combinação de configurações da válvula, para 5 N e 50 N, e da pré-impregnadora, para 0 rpm, 1 rpm e 3 rpm. O sistema foi ainda submetido a perturbações para observar a robustez do sistema de controlo, deslocando, na vertical, a fibra alguns centímetros.

O seguinte gráfico mostra um teste completo do controlador proporcional para 5 N, repetido para os outros controladores e para 50N. O teste, ao ser igual para todos, permite homogeneizar as circunstâncias de cada um e obter conclusões mais fiáveis.

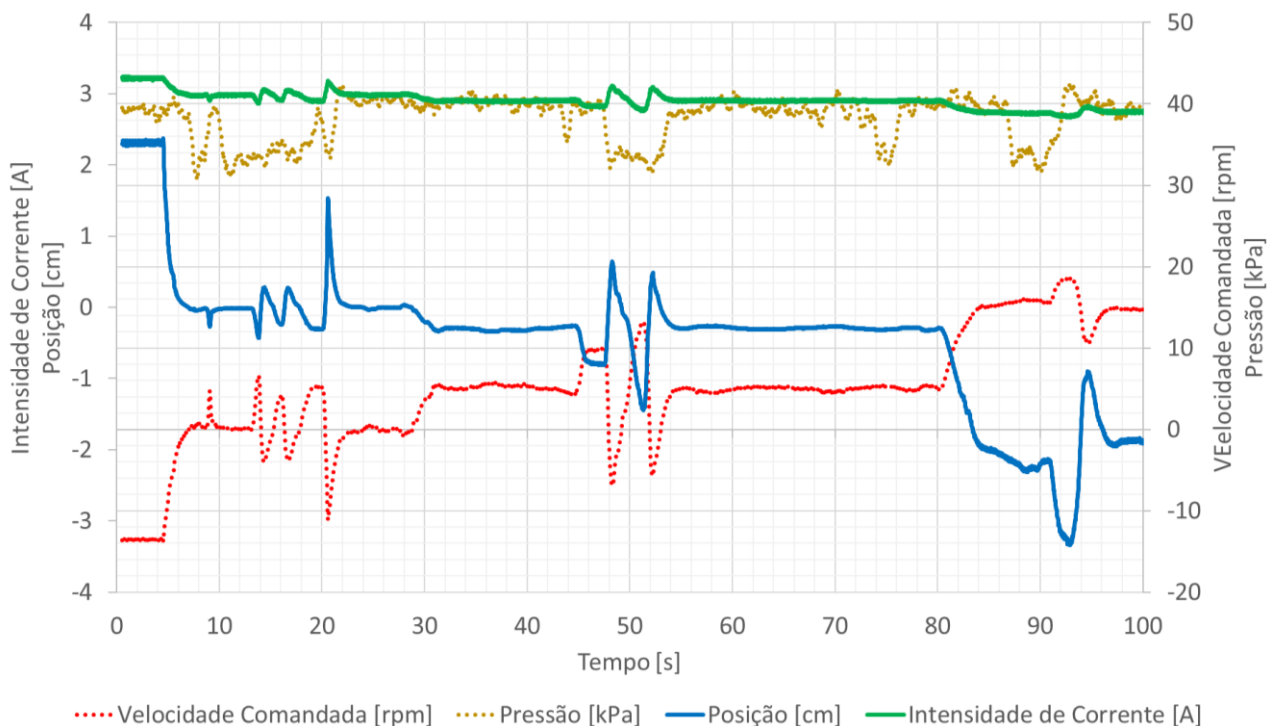


Figura 66 - Teste completo de um controlador P para 5 N de tensão de fibra.

No gráfico é observado a evolução das quatro grandezas monitorizadas, nomeadamente, a intensidade de corrente, a pressão da válvula de precisão, a posição do *dancer* e a velocidade do motor. A intensidade de corrente reflete as variações de velocidade e o binário necessário para impor a tensão desejada na fibra e a pressão tem um comportamento independente do controlador utilizado. Isto é, as variações de pressão provocadas por perturbações não se demonstraram dependentes do controlador implementado, mas sim do funcionamento da válvula de precisão. Assim sendo, por não serem valores relevantes nas conclusões a tirar para cada um dos controladores, serão omitidos dos testes.

As variações de pressão durante as perturbações são uma fonte de erro na tensão da fibra. A leitura analógica na placa de desenvolvimento apresenta ruído e alguma disparidade em relação aos valores realmente observados no mostrador do sensor de pressão montado na válvula de precisão e, na seguinte tabela, apresenta-se as variações máximas de pressão observadas para as perturbações efetuados:

Tabela 17 - Erros de pressão e tensão máximos provocados por perturbações efetuadas durante os testes.

Pressão Configurada [kPa]	Tensão Desejada [N]	Variação de Pressão [kPa]	Variação de Tensão [T]
32	5	1	0,25
214	50	9	2,21

Observou-se, assim, que a tensão imposta à fibra varia até 5%. Essas perturbações apenas ocorrem durante alguns instantes, cerca de 1 segundo, correspondente ao tempo que a válvula de precisão demora a voltar a estabilizar à pressão desejada. Na prática, esta variação não irá surtir efeitos na tensão da fibra durante a impregnação e enrolamento porque ambos os processos são muito mais lentos do que a resposta à perturbação.

Não foi testado a tensão máxima prevista de 100 N por duas limitações técnicas alheias ao mecanismo desenvolvido. A fibra foi testada conforme fornecida, sem ser realizada impregnação. A fibra quando desprotegida, tende a rasgar para tensões maiores, devido a contacto com algumas superfícies, o que impossibilitou testes conclusivos, com a pré-impregnadora parada.

Por outro lado, o enrolador trava acima de 60N de tensão, sendo a razão mais plausível a existência configurações de segurança da própria máquina, que não foram possíveis de aceder devido às restrições referidas anteriormente. A tensão aplicada em cada um dos rolos do bloco de impregnação em contacto com a fibra, provocam um momento fletor no parafuso sem-fim que movimenta e guia o carro do bloco de impregnação. Após a experiência a 100 N foi observado que o acoplador entre o parafuso e o servomotor se encontrava danificado, por não estar dimensionado para esta tensão de funcionamento. É, assim, possível, também, que seja limitada a corrente dos motores ou que exista outras funções semelhantes que impeçam o movimento de ambos os motores perante este tipo de esforços.

Numa primeira fase serão apresentados os controladores P, PI e PID e são comparados os comportamentos para cada um dos testes realizados. De seguida, serão apresentadas melhorias para resolver problemas dos controladores P e PI.

6.2.1. Controlador P, PI e PID

Para o controlo proporcional foi arbitrado uma constante proporcional $K_p = 0,25$. A placa de desenvolvimento lê as entradas de 0 a 1023 e escreve de 0 a 255, assim $K_p = 0,25$ fará com que o erro máximo corresponda à velocidade máxima do motor. É de realçar que K_p é adimensional, uma vez que a medição é um número adimensional de 0 a 1023 e ação de controlo toma forma de um número também adimensional de 0 a 255, relacionado com o *duty cycle* do sinal PWM.

A seguinte figura mostra o diagrama de blocos do sistema em malha fechada com o controlador PID implementado. $G(s)$ é a função transferência do sistema de $G_t(s)$ a função transferência do transdutor de posição de fotorresistências.

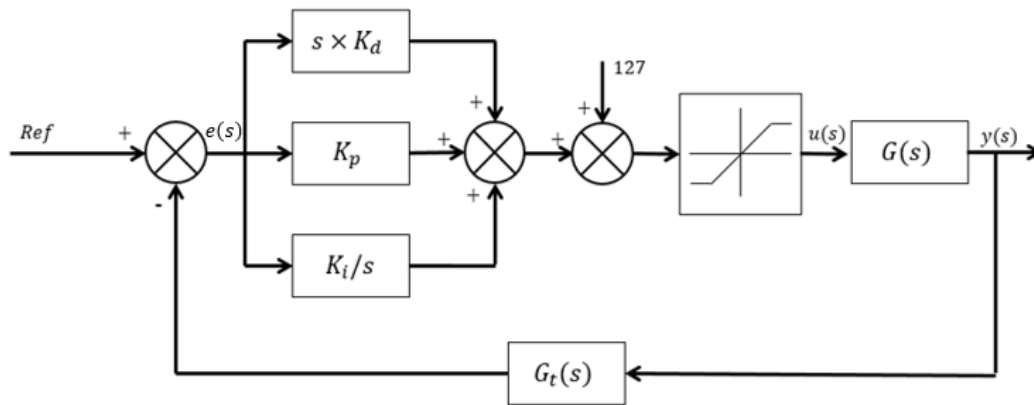


Figura 67 - Diagrama de blocos do sistema em controlo malha fechada.

Com vista a verificar a pertinência de corrigir o erro estacionário do sistema em controlo proporcional e verificar se as suas desvantagens são negligenciáveis comparativamente à vantagem do erro nulo, foi introduzido uma função integral no controlo. Uma função integral atua sobre o integral do erro, isto é, mesmo quando o erro é nulo, pode continuar a efetuar uma ação de controlo. A função integral aumenta o tipo e grau do sistema, fazendo com que o erro a uma dada solicitação que, sem essa função, tenderia para um valor constante e não nulo, tenda para zero.

Para arbitrar o valor de K_p e K_i , foi tomado em consideração o K_p anterior de 0,25 e foram utilizadas as fórmulas do primeiro método de Ziegler-Nichols, para determinar os parâmetros de controlo. A constante de um controlo proporcional por este método tomaria o valor T/L , para controlo proporcional e integral tomaria os seguintes valores:

$$K_p = \frac{T}{L} \times 0,9 = 0,25 \times 0,9 = 0,225$$

$$K_i = 0,3 \times K_p / L$$

Destaca-se que L é o atraso de transporte do sistema que será, normalmente, baixo, mas será função do estado inicial do sistema. O atraso de transporte é o tempo que demora entre ser dado

uma ordem de controlo e a ação de controlo começar a ter repercussões no que está a ser controlado. O atraso de transporte vai depender do estado da fibra no início da impregnação, uma vez que o motor do alimentador, no início do processo, irá enrolar a fibra em excesso até que esta fique justa aos rolos e possa começar a ser tensionada.

Assim, L vai depender dessa fibra em excesso, e será tanto maior quanto maior for o excesso. K_i é tanto menor quanto maior for esse atraso, pois enquanto o sistema está à espera que a atuação surta efeito, o erro integral continuará a acumular-se. E quanto maior for este erro, maior será a componente de ação de controlo integral. Assim, K_i tem de ser coerente com L para que a sua componente não seja excessivamente elevada e evitar que provoque uma sobre-elongação excessiva que danifique o sistema ou a fibra.

Num dos primeiros testes efetuados com função integral, o cilindro atingiu uma posição fora dos limites de controlo e o excesso de tensão devido à sobre elongação provocou a quebra da fibra, devido a uma ação de controlo demasiado elevada durante demasiado tempo. Nalgumas situações pode-se introduzir função de saturação no controlo, isto é, colocar um limite máximo na ação de controlo. Neste caso, não é aplicável, porque as velocidades máximas do motor podem ser também importantes e não é a velocidade em si que causa problemas no sistema e sim o motor continuar a enrolar quando o cilindro já está completamente recuado e a tensão da fibra aumenta até quebrar. Para estes testes foi reiniciado manualmente o erro, imediatamente antes de iniciar o funcionamento do desenrolador, evitando que o erro integral se tornasse excessivamente elevado para o K_i escolhido.

Como L é função do estado da fibra, foi arbitrado $L = 1$ s, um tempo aceitável uma vez que é possível manualmente retroceder a fibra antes de iniciar o controlo.

$$K_i = 0,3 \times 0,225 \times 1 = 0,0675 \text{ s}^{-1}$$

Uma função derivativa de um controlador tem como função “antecipar” o erro, pois atua sobre a variação do erro, tomando uma ação de correção antes que o erro fique maior. Podendo-se dizer que aumenta a sensibilidade do sistema. Ao juntar a função derivativa a um controlador PI, deverá ser notado uma diminuição da sobre-elongação. Contudo é sabido que o erro derivativo é muito sensível ao ruído de um sistema, sendo previsível alguns problemas devido ao ruído que possui o sensor. Contudo é necessário confirmar se o ruído, de facto, prejudica o controlo PID. Recorrendo ao mesmo método, que anteriormente, para arbitrar os valores iniciais de K_p , K_i e K_d :

$$K_p = 1,2 \times 0,25 = 0,3$$

$$K_i = \frac{K_p}{2 \times L} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ s}^{-1}$$

$$K_d = 0,5 \times L \times K_p = 0,5 \times 1 \times K_p = 0,15 \text{ s}$$

A seguinte tabela resume os parâmetros de controlo utilizados:

Tabela 18 - Parâmetros de controlo dos controladores testados

Tipo de Controlador	Parâmetro de Controlo		
	K_p	K_i	K_d
P	0,25	-	-
PI	0,225	0,0675	-
PID	0,3	0,15	0,15

Testes a 0 rpm

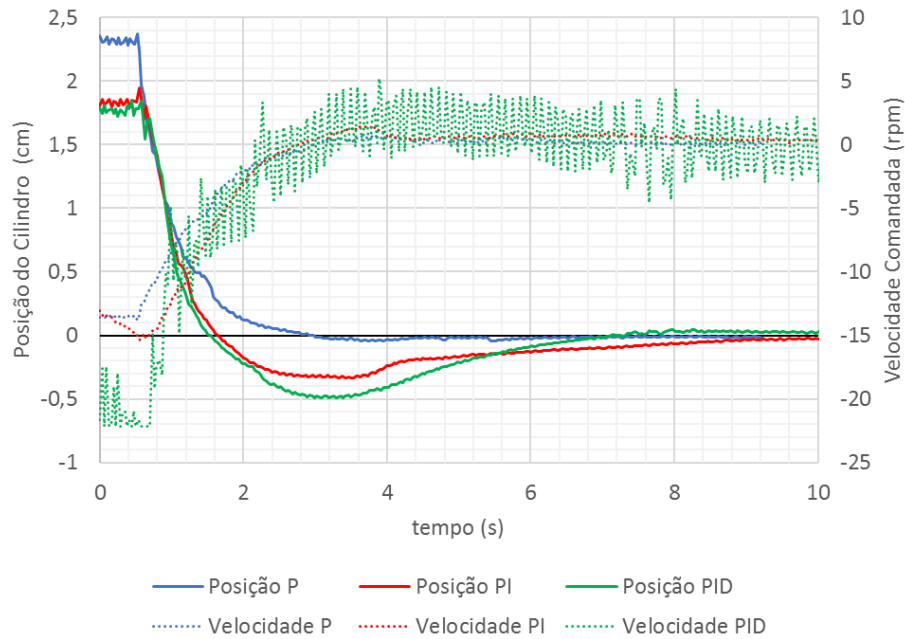


Figura 68 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para 0 rpm e 5 N.

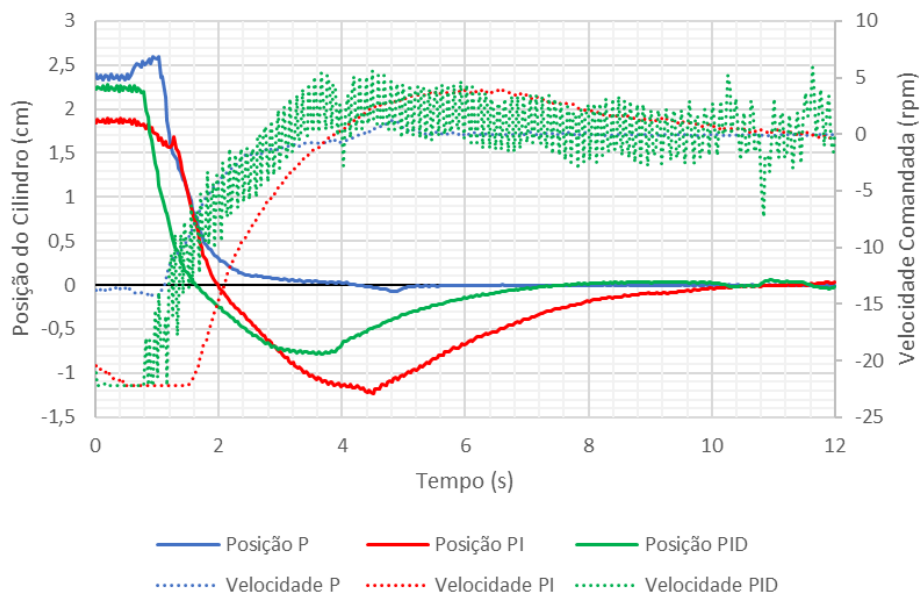


Figura 69 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para o teste a 0 rpm e 50 N.

Nos testes a 0 rpm, foi observado um erro em regime permanente para o controlador proporcional de cerca de 0,2 mm, não visível na escala destes gráficos. O controlador PI, como seria de esperar, é o que possui maior sobre-elongação e é o que demora mais tempo a corrigir a posição do *dancer*. Verifica-se uma grande irregularidade do funcionamento do controlador PID, por reagir ao ruído do sensor, tendo muitas variações de velocidade ao longo do seu funcionamento e, mesmo na zona de erro nulo, o motor irá rodar alternadamente nos dois sentidos.

Testes a 1 rpm

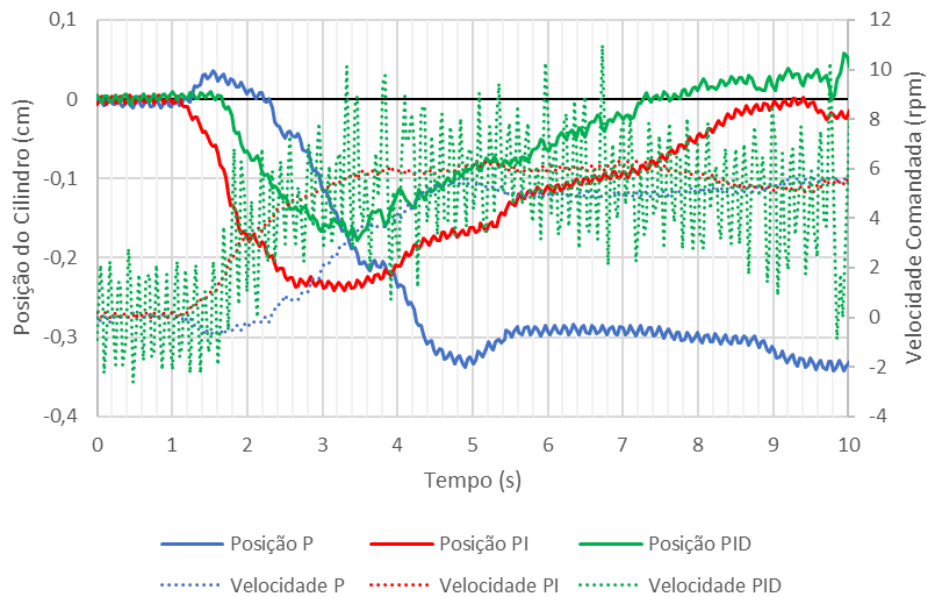


Figura 70 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 1 rpm e 5 N.

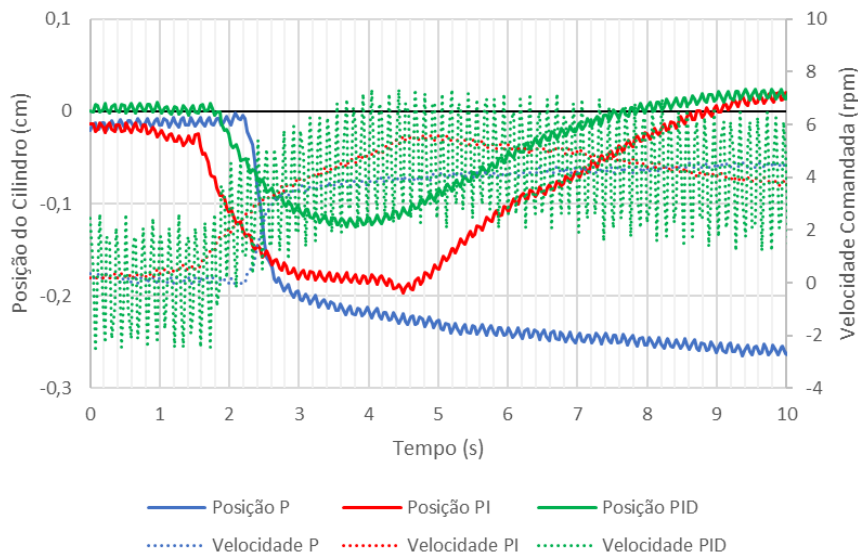


Figura 71 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 1 rpm e 50 N.

O funcionamento a 1 rpm demonstra um erro em regime permanente muito superior do que a 0 rpm para o controlador proporcional, que para tensões superiores é menor. No caso tratam-se de cerca de 3,5 mm e 2,7 mm para 5 N e 50 N, respetivamente. Em ambos os casos, o dancer encontra-se ainda numa posição de elevada sensibilidade do sensor. Nesta situação o controlador PI já não causa problemas com a sobre-elongação, o sistema reage imediatamente a uma variação de velocidade do enrolador. O erro máximo devido ao início do movimento a 1 rpm é superior para menores tensões, e o retorno para a posição é ligeiramente irregular para baixas tensões. O controlador PID continua a ser considerado não viável para uso com este sensor, devido ao ruído.

Testes a 3 rpm

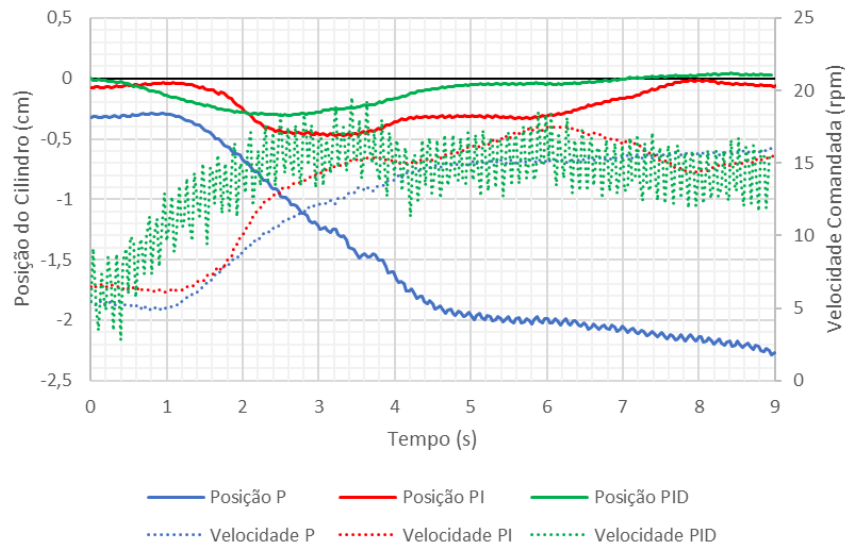


Figura 72 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 3 rpm e 5 N.

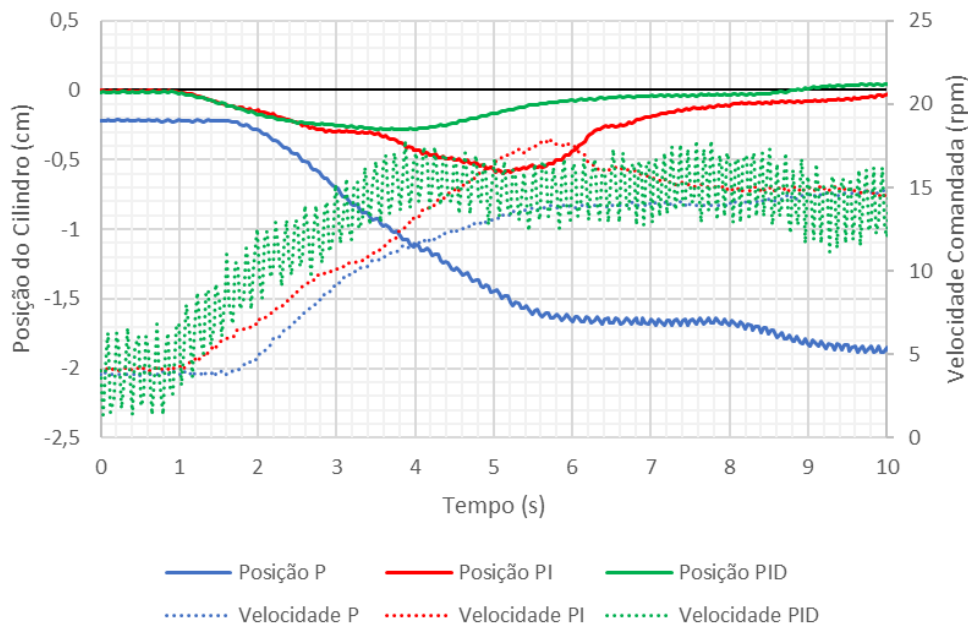


Figura 73 - Resultados experimentais dos controladores P, PI e PID para os testes a 3 rpm e 50 N.

O funcionamento a 3 rpm demonstra um novo aumento do erro em regime permanente para o controlo proporcional, sendo de cerca de 22,5 mm e 19 mm, para 5 e 50 N respetivamente, isto revela que o erro em regime permanente é função da tensão e da velocidade da impregnadora. O erro tende a diminuir com o aumento da tensão, o que indica que para 100 N os testes deveriam ser na mesma válidos. O erro tende a levar o dancer para uma zona de menor sensibilidade do sensor, que, por exemplo, causa uma menor capacidade de resposta a perturbações.

Contudo, o controlador proporcional é uma solução viável uma vez que o erro máximo para a situação mais crítica, 3 rpm, permanece dentro da zona validade do *dancer*, sendo possível melhorar o seu funcionamento se for reduzido o erro.

O controlador PI anula o erro em regime permanente, garantindo que o *dancer* está sempre na zona de máxima sensibilidade, mas a sobre-elongação para 0 rpm torna inviável a sua utilização

O controlador PID não é adequado para este sistema uma vez que o sensor utilizado possui muito ruído, e assim a velocidade do motor será muito irregular. Do ponto de vista do utilizador é uma solução pouco interessante, este funcionamento causa mais ruído sonoro e fará o sistema aparentar alguma espécie de mau funcionamento ou avaria que não se verifica. Ainda assim, a maior consequência deste funcionamento será o maior desgaste a que as componentes mecânicas do sistema estarão sujeitas, reduzindo o seu tempo de vida.

Ainda assim, em contrapartida, o sensor de posição, com maior sensibilidade na zona central, substitui algumas vantagens do controlo derivativo, uma vez que uma variação pequena junto ao ponto central do sensor irá implicar a mesma ação proporcional do que um erro maior para um sensor linear de sensibilidade constante. Assim sendo um controlador P ou PI, ao ser utilizado, com este sensor, inclui algumas vantagens de um controlo PD ou PID, de uma atuação mais rápida ao erro.

6.2.2. Melhorias no Controlo Proporcional

Com vista a melhorar o comportamento do controlo proporcional, foram produzidas duas alternativas com vista a reduzir o erro em regime permanente no controlo proporcional. Foi testado um controlador proporcional com constante de proporcionalidade superior ao anterior e outro com uma referência diferente

O erro em regime permanente é função de K_p , sendo tanto menor quanto maior for K_p . Para um K_p infinito será de prever um erro a tender para 0, contudo um controlador proporcional demasiado elevado causará instabilidade no sistema, não sendo possível aumentar indefinidamente a constante de erro proporcional. Neste caso, foi arbitrado que K_p seria igual a 0,35 para verificar o comportamento do controlador perante um aumento do ganho proporcional.

Por outro lado, é possível alterar a referência, desviando-a do ponto desejado com vista a posição para que o *dancer* irá tender, com o erro, acompanhe esse desvio. Assim foi deslocado a posição desejada, da posição central, 0 cm, para 0,33 cm, correspondente ao valor “700” nas unidades da placa de desenvolvimento.

Testes a 0 rpm

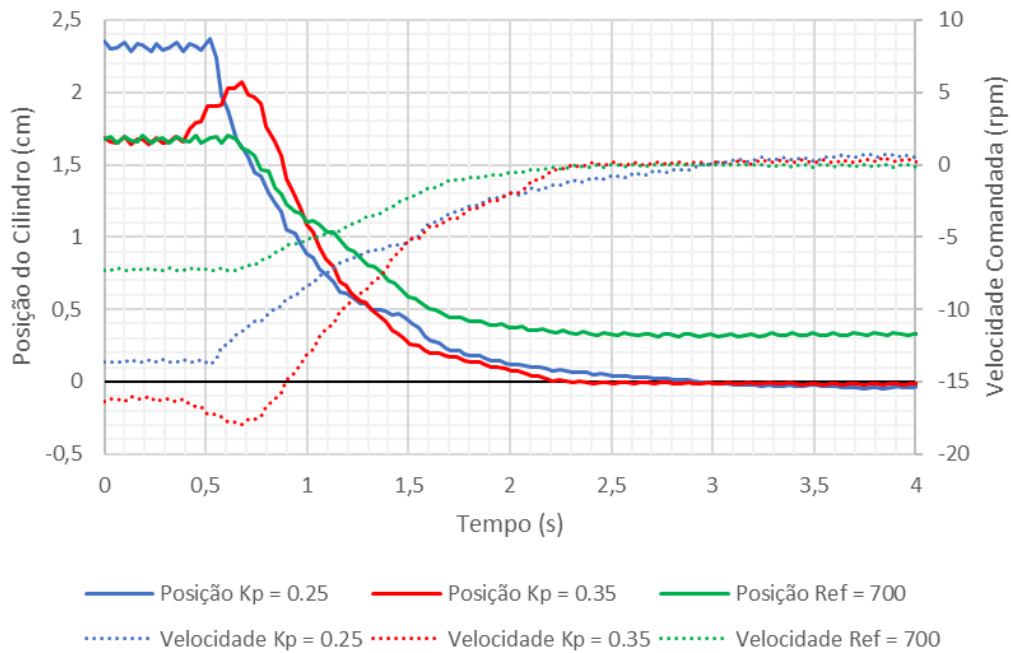


Figura 74 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 0 rpm e 5 N.

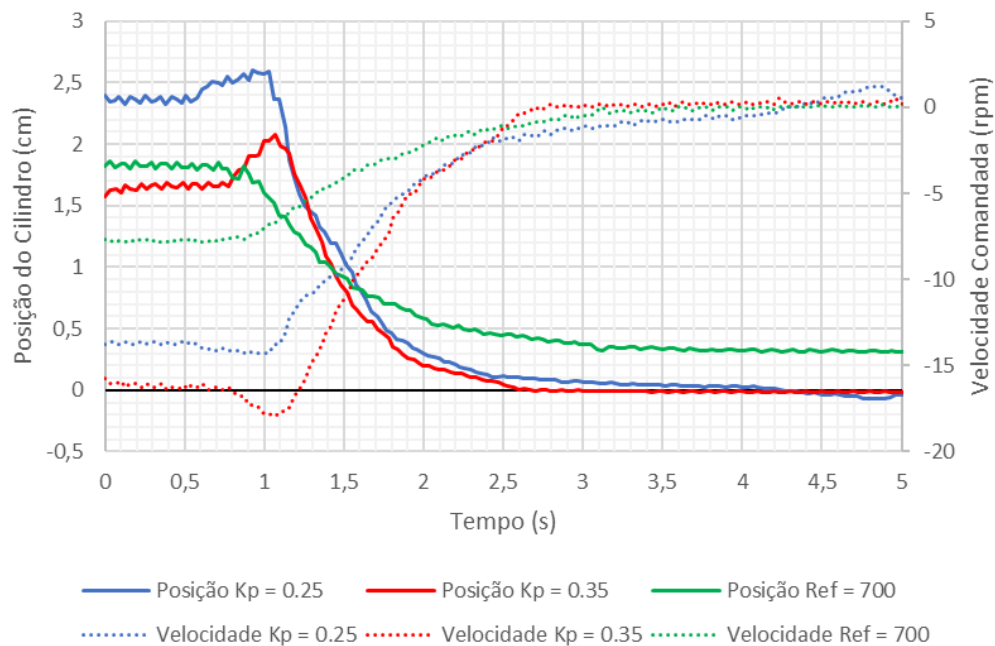


Figura 75 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 0 rpm e 50 N.

O aumento de K_p permitiu atingir um erro em regime permanente praticamente nulo, deslocar a posição desejada fez com que a posição em regime permanente ficasse a cerca de 3 e 4 mm da posição central, para 50 N e 5 N, correspondentemente.

Testes a 1 rpm

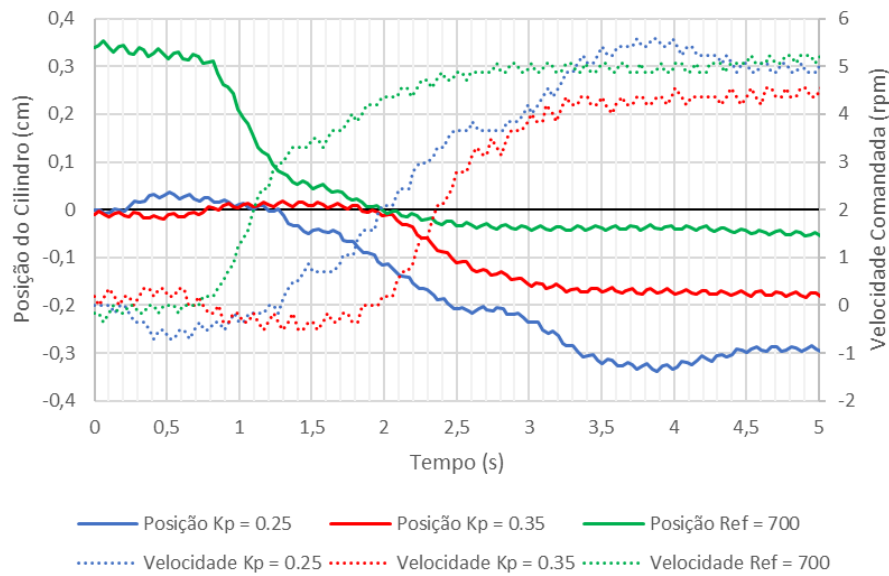


Figura 76 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 1 rpm e 5 N.

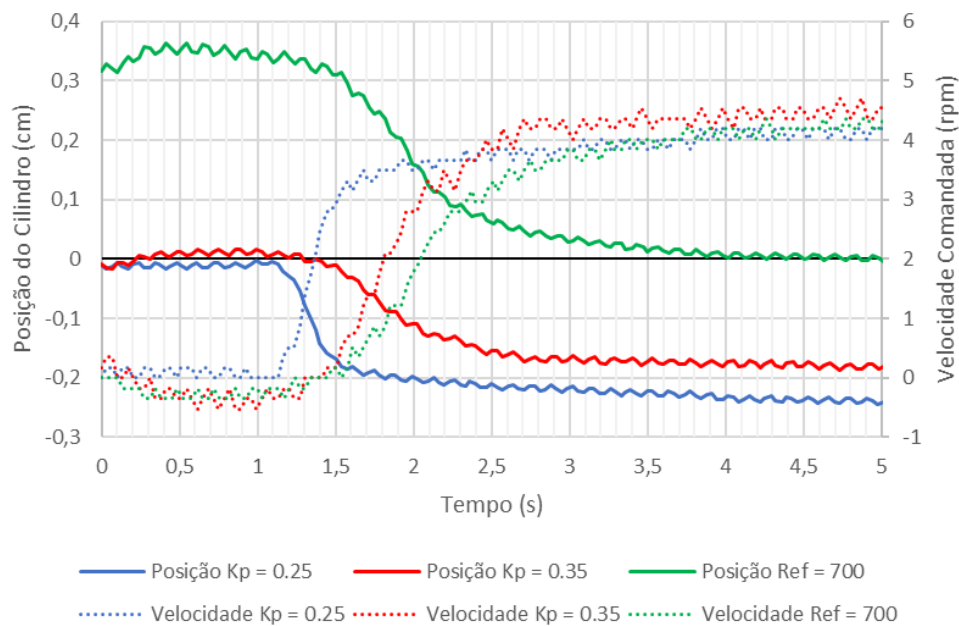


Figura 77 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 1 rpm e 50 N.

Para 1 rpm e a 50 N, deslocar a posição desejada fez com que a posição do dancer tendesse para um ponto muito próximo da posição central. O caso de 5 N indica que a posição desejada deveria ser ainda superior a 700 para que a posição em regime permanente fosse deslocada para a posição central. O aumento de Kp diminuiu o erro, mas não foi efetivo a anulá-lo, foi também observado alguma irregularidade na velocidade do motor

Testes a 3 rpm

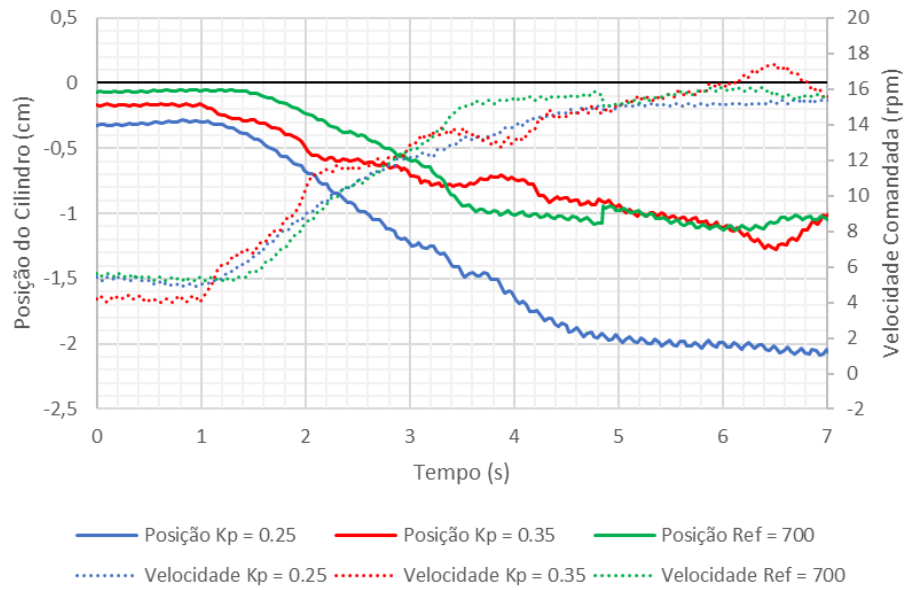


Figura 78 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 3 rpm e 5 N.

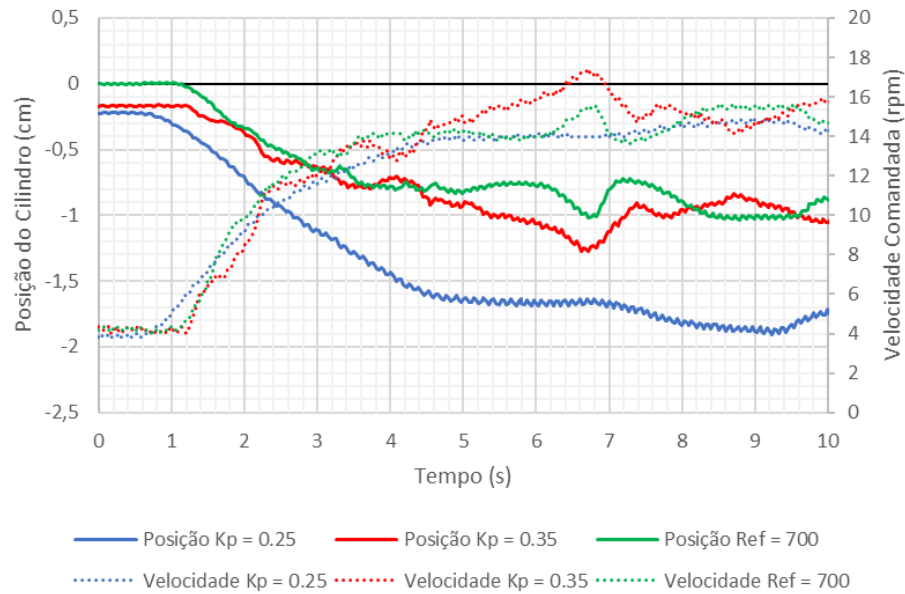


Figura 79 - Resultados experimentais dos controladores proporcionais para o teste a 3 rpm e 50 N.

Para 3 rpm, foi verificada alguma irregularidade dos controlos proporcionais modificados. Por coincidência, para 5 N e 50 N, de ambos os controladores, a posição em regime permanente parece tender para o mesmo valor, mas confirma, uma vez mais, a ineficácia do aumento de K_p , para resolver o erro em regime permanente, e revela que, para funcionar a 3 rpm, a referência deveria ser ainda maior.

Ambas as soluções permitem levar o *dancer* para uma zona de maior sensibilidade do que o controlador proporcional inicial.

A solução de aumentar o ganho proporcional tende a aumentar algumas irregularidades do funcionamento do motor, sem garantir erro nulo. O deslocamento da posição desejada pode permitir, nas condições corretas que o *dancer* se posicione no seu centro.

6.2.3. Melhorias no Controlo Proporcional-Integral

Como se viu, um controlo do tipo PI não é viável porque em certas situações pode levar a quebra da fibra.

O gráfico da Figura 80 indica duas situações em que, para a mesma tensão e velocidade, foi deixado acumular erro durante 1 segundo e 5 segundos, antes de ativar o funcionamento do motor, observando-se a diferença da sobre-elongação. Na situação dos 5 segundos a sobre-elongação foi maior cerca de 2 cm, e para um maior tempo de espera a sobre-elongação aumentaria até aos limites físicos do *dancer* onde a tensão não é controlada e poderia aumentar até a fibra quebrar.

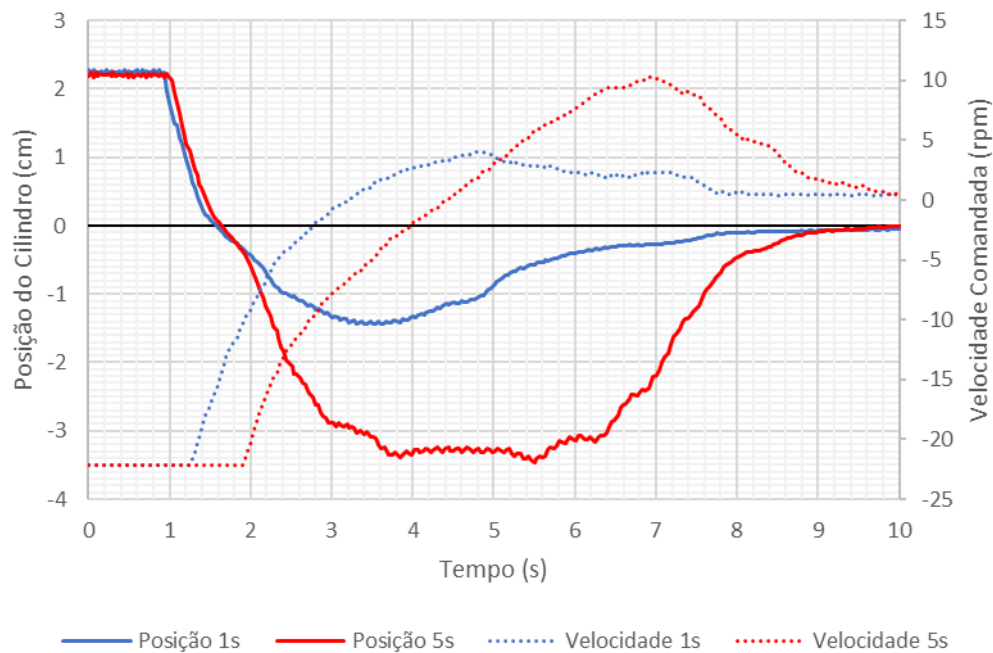


Figura 80 - Demonstração do problema da sobre-elongação do controlador PI

O erro integral, enquanto o erro proporcional não é corrigido, continua a ser acumulado até a um ponto que pode ser demasiado elevado. Uma solução possível é saturar o erro integral, não aumentando a partir de um dado valor, como visto no diagrama de blocos da Figura 81.

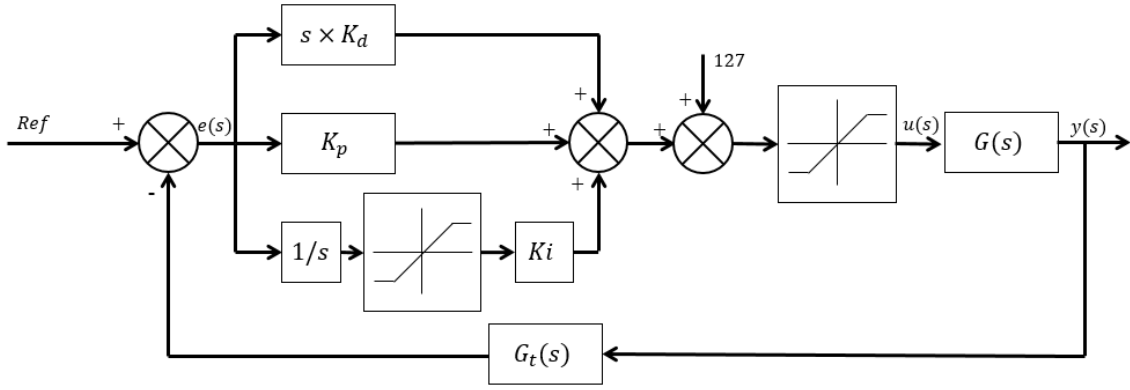


Figura 81 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada com função de anti-windup.

O erro integral é, em valor absoluto, superior ao programado, tomará esse valor máximo em vez de somar. Foram considerados dois erros integrais máximos, uma vez que o primeiro testado não permitiu, como se verá, corrigir o erro em regime permanente. Sabendo que a ação de controlo é dada por:

$$u = Kp \times e_p + Ki \times e_i$$

$$Kp = 0,225$$

$$Ki = 0,0675 \text{ s}^{-1}$$

Sabendo que a posição pretendida para o dancer é 600, foi arbitrado que a partir da posição 300, que equivale a uma distância de 15 mm da posição central, o erro proporcional tem de ser sempre dominante em relação ao erro proporcional, assim sendo:

$$u = Kp \times e_p + Ki \times e_i$$

$$0 = 0,225 \times (-300) + 0,0675 \times e_i^{max}$$

$$e_i^{max} = 1000 \text{ s}$$

Este erro foi demasiado conservador e foi ajustado o erro proporcional considerado para 400.

$$u = Kp \times e_p + Ki \times e_i$$

$$0 = 0,225 \times (-400) + 0,0675 \times e_i^{max}$$

$$e_i^{max} = 1333 \text{ s}$$

Foi arredondado esse erro máximo para 1300 para manter uma solução mais conservadora e ser um valor mais arredondado, e o erro para o qual a ação proporcional é sempre dominante é:

$$u = Kp \times e_p + Ki \times e_i$$

$$0 = 0,225 \times e_p^{max} + 0,0675 \times (-1300)$$

$$e_p^{max} = 390$$

Testes a 0 rpm

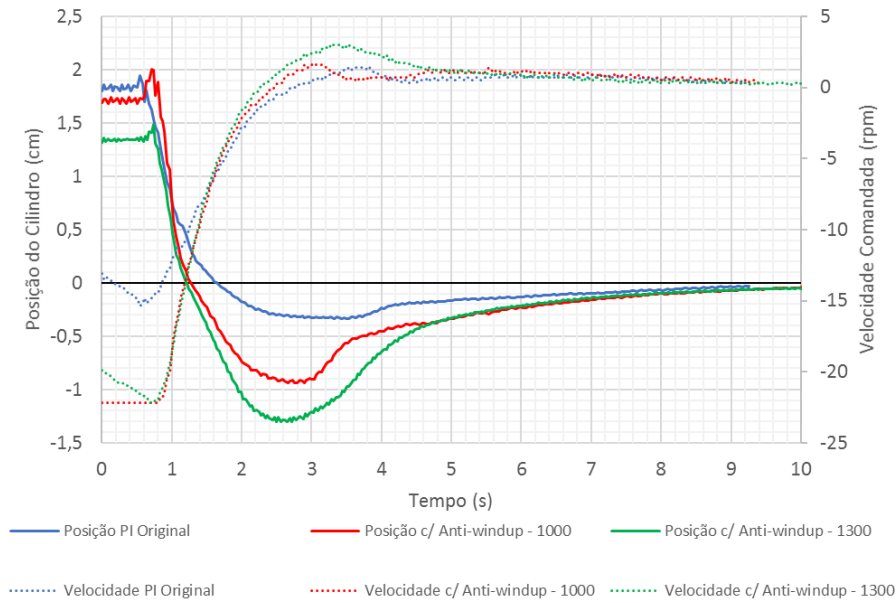


Figura 82 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 0 rpm e 5 N.

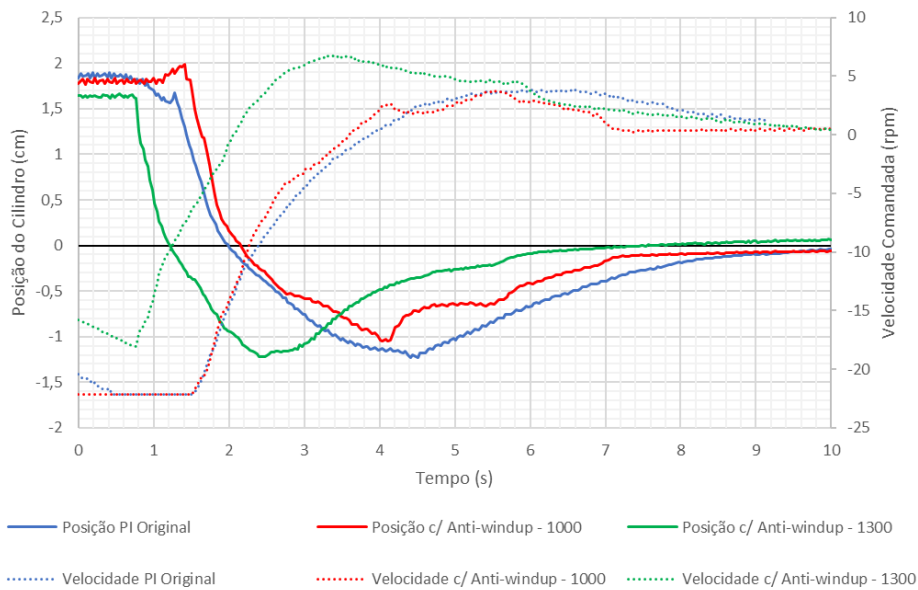


Figura 83 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 0 rpm e 50 N.

Apesar dos gráficos aparentarem um aumento da sobre-elongação no teste a 50 N, isto deve-se a, para o controlador PI original, ter sido reiniciado o erro antes de iniciar o funcionamento do motor. Nos controladores com limite de erro integral, não era necessária essa preocupação pois a sobre-elongação nunca se prolongava até aos limites funcionais do *dancer*. Nesta situação o anti-windup configurado com erro integral máximo 1000, aparenta ser uma solução boa, revelando sempre a menor sobre-elongação, como seria de esperar.

Testes a 1 rpm

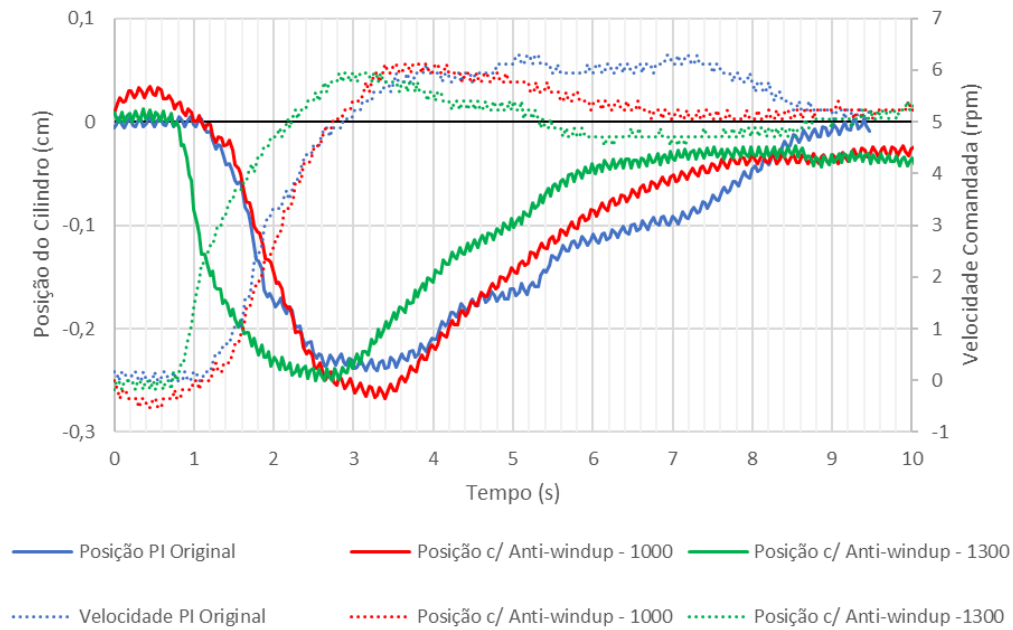


Figura 84 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 1 rpm e 5 N.

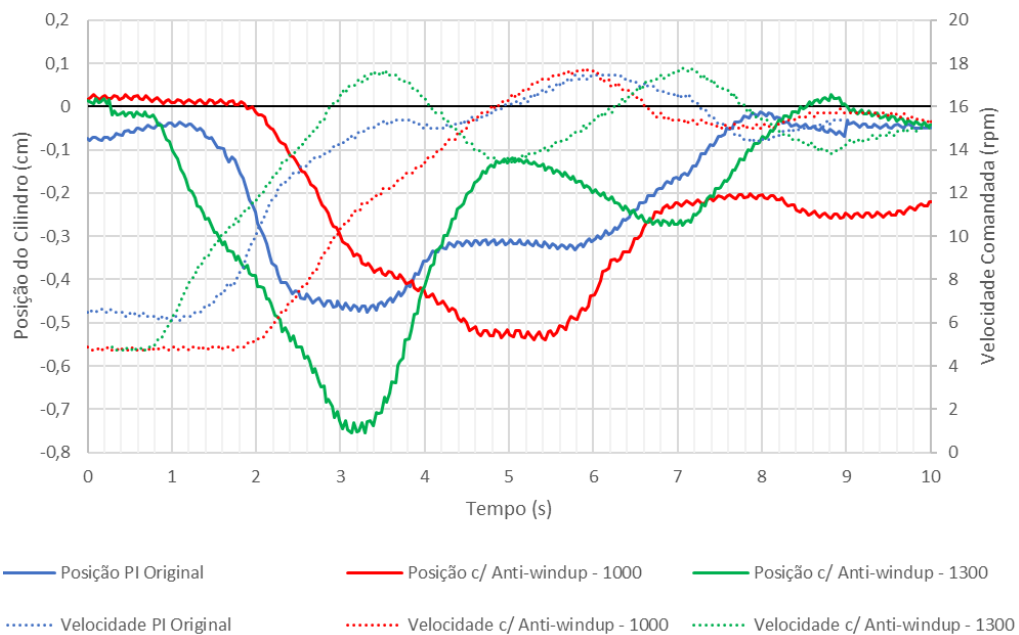


Figura 85 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 1 rpm e 50 N.

Nos testes a 1 rpm, verificou-se que os controladores PI com anti-windup demoraram mais tempo a anular o erro de posição e que o controlador com erro integral máximo de 1000 não é capaz de o anular completamente, mantendo um erro em regime permanente, tendo sido por isso necessário substituir o erro máximo por um valor superior, o de 1300.

Testes a 3 rpm

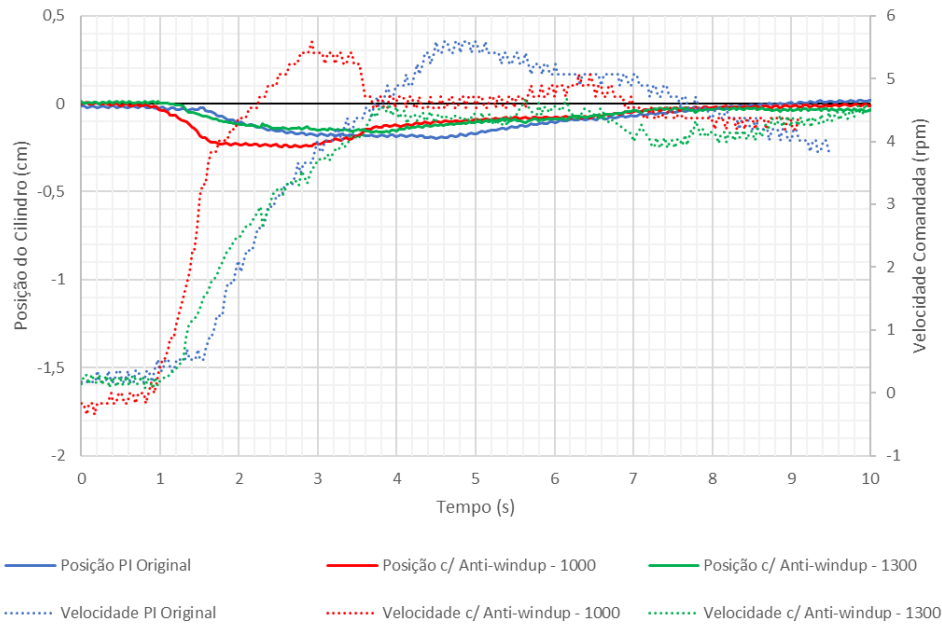


Figura 86 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 3 rpm e 5 N.

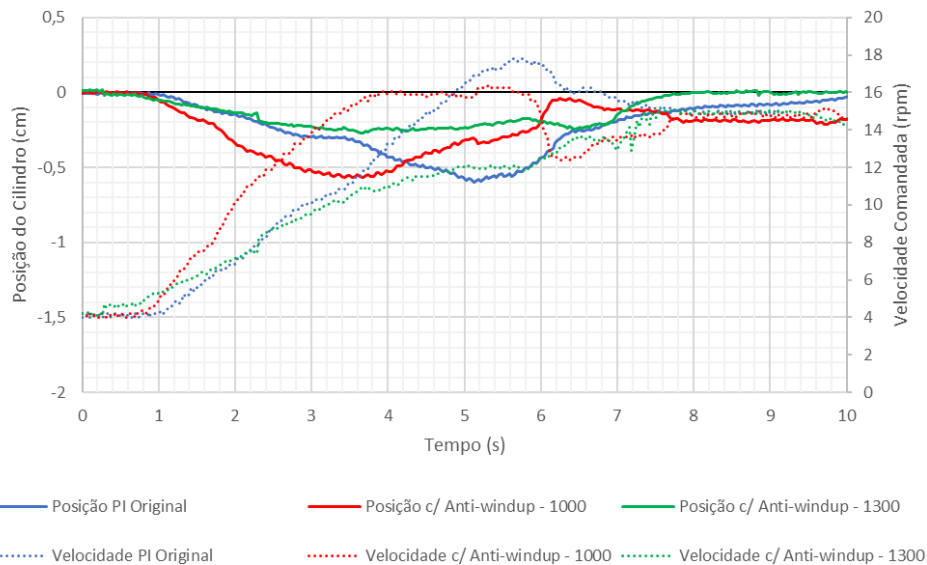


Figura 87 - Resultados experimentais dos controladores PI com anti-windup para o teste a 3 rpm e 50 N.

Este teste, confirmou novamente o bom funcionamento do controlador com anti-windup configurado para um erro integral máximo de 1300 s, e que 1000 s é uma solução demasiado conservadora que não permite correção do erro em regime permanente.

Assim é permitido utilizar a função integral, possibilitando que o *dancer* se encontre sempre na posição de máxima sensibilidade, sem prejuízo de sobre-elongação excessiva que danificaria a fibra.

7. Conclusões

Esta tese teve como principal objetivo a conceção de um mecanismo de controlo da tensão de fibras durante o processo de pré-impregnação. Esse mecanismo deveria ser modular, barato e de fácil reprodução para futuramente aumentar o número de fibras por pré-impregnado.

Um dos parâmetros que é possível controlar num processo de pré-impregnação é a tensão da fibra que se reflete na eficiência da impregnação. A variação da largura e abertura das fibras, assim como a quantidade e distribuição de resina, tem implicações nas suas tensões residuais e nos vazios do produto final, que, por sua vez, influenciam o seu comportamento mecânico.

Foram comparadas conceptualmente duas opções habituais em indústrias com as mesmas necessidades que a indústria dos compósitos, como indústria do papel. As duas soluções mais utilizadas são baseadas num *dancer* ou numa célula de carga. Preferiu-se a utilização de um sistema de *dancer* composto por um cilindro pneumático capaz de absorver algumas oscilações do estado de tensão da fibra, mantendo-a constante desde que a sua posição seja mantida num intervalo de operação.

Para conhecer a posição do cilindro foi desenvolvido um sensor de posição, baseado em fotorresistências que seriam tapadas de uma fonte luminosa por um elemento móvel solidário ao cilindro dependendo da sua posição. Este sensor não possui uma característica linear, mas possui elevada sensibilidade na zona central do curso, melhorando a capacidade de resposta do sistema a variações da posição do cilindro na vizinhança desse ponto. O sensor desenvolvido tem algumas limitações, também, quanto ao ruído, precisão e repetibilidade. Estas limitações na performance do sensor não têm implicações substanciais no controlo, pois os controladores desenvolvidos têm robustez adequada e o objetivo de controlo é garantir que o cilindro se mantém numa zona válida do seu curso, não sendo relevante a posição exata.

O sistema controla então a posição do cilindro pneumático atuando sobre a velocidade do desenrolador da fibra, que consiste essencialmente num motor DC e respetivo redutor. Este conjunto revelou-se a solução mais económica, a seguir aos motores trifásicos que, apesar do menor custo, trariam algumas reservas no controlo devido à sua elevada potência em relação à potência necessária, dificultando o controlo de binário na gama pretendida.

Realizaram-se testes com vários controladores PID. A função derivativa não se demonstrou adequada pois sai prejudicada pela sensibilidade ao elevado ruído do sensor de posição. A função integral necessita de uma limitação do seu erro integral máximo para não haver risco de a sobre-elongação ser excessiva e danificar a fibra. Um controlador apenas com função proporcional possui um erro em regime permanente, função da velocidade de impregnação e da tensão da fibra, que não permite ao *dancer* permanecer na posição de máxima sensibilidade do sensor.

Para melhorar o controlo proporcional foi testado um ganho proporcional superior e uma referência de posição deslocada do centro. Ambas as soluções permitem uma diminuição do erro em regime permanente, mas nunca o anulando. A solução de modificar o ganho, pode aumentar a instabilidade do sistema não sendo por isso aconselhada, mas a segunda opção poderá ser útil com alguns ajustes, por exemplo fazendo a referência variar, dependendo do erro em regime permanente observado, que fica como proposta de melhoria futura deste projeto.

No controlo proporcional e integral foi introduzida uma função de *anti-windup*, que limita o erro integral, não permitindo o sistema embalar para uma posição perigosa para o seu funcionamento.

Quando foram aplicadas perturbações no sistema de alimentação das fibras, verificaram-se variações de até 5% pressão do sistema pneumático, por muito breves instantes (<1s) o que terá implicação na tensão instantânea das fibras. No entanto, por serem fenómenos muito breves, terão muito pouca influência na qualidade dos pré-impregnados produzidos.

Todo o sistema foi desenvolvido com um custo em material de, aproximadamente, 1700 €, não contabilizando custos de mão-de-obra, consumíveis e outros custos pouco significativos. O sistema em malha aberta em utilização na máquina pré-impregnadora no início deste trabalho custou cerca de 12000 € o que revela uma poupança na ordem dos 86%.

O sistema desenvolvido, e já em funcionamento, deverá, no entanto, ser melhorado com uma estrutura física definitiva mais resistente e duradoura, medidas de segurança que permitam um funcionamento mais autónomo com menor necessidade de supervisão e um controlo otimizado.

São também propostas melhorias à máquina de pré-impregnação, tendo este documento como suporte, devido ao estudo dos vários componentes da máquina. É proposta a montagem de um sistema de monitorização da tensão da fibra junto ao tambor de enrolamento ou antes do banho de resina, assim como um sistema de monitorização da dispersão das fibras durante a impregnação.

No sentido de prosseguir a investigação rumo à produção de pré-impregnados compostos por mais do que um tipo de fibra é proposto o desenvolvimento de um sistema capaz de integrar dois ou mais tipos de fibra e de misturar filamentos.

Referências

- [1] J. Hult and F. G. Rammerstorfer, *Engineering Mechanics of Fibre Reinforced Polymers and Composite Structures*. Springer Vienna, 2014.
- [2] ASM International, *ASM Handbook: Volume 21*. Materials Park, 2001.
- [3] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*. CRC Press, 2005.
- [4] A. T. Marques, “Sistemas Compósitos: Conceber e Fabricar Para Durar. Apontamento da UC Sistemas Compósitos.” 2016.
- [5] Granta Design Limited, “CES Edupack 2014.” 2014.
- [6] P. Mertiny and F. Ellyin, “Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 12, pp. 1615–1622, 2002.
- [7] P. Mertiny and F. Ellyin, “Selection of optimal processing parameters in filament winding,” in *International SAMPE Technical Conference*, 2001, vol. 33, pp. 1084–1095.
- [8] Q. Wang, W. Zou, D. Xu, F. Liu, and H. Li, “Analysis on the influence factors of fiber tension in fiber placement,” *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. pp. 1159–1164, 2016.
- [9] K. J. Ahn and J. C. Seferis, “Prepreg processing science and engineering,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 33, no. 18, pp. 1177–1188, 1993.
- [10] P. Peltonen, K. Lahteenkorva, E. J. Paakkonen, P. K. Jarvela, and P. Tormala, “The Influence of Melt Impregnation Parameters on the Degree of Impregnation of a Polypropylene/Glass Fibre Prepreg,” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 5, no. 4, pp. 318–343, Oct. 1992.
- [11] X. LIU and F. CHEN, “A review of void formation and its effects on the mechanical performance of carbon fiber reinforced plastic,” *Eng. Trans. Vol 64, No 1*, Feb. 2016.
- [12] C. Aleong and M. Munro, “Effect of winding tension and cure schedule on residual stresses in radially-thick fiber composite rings,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 31, no. 18, pp. 1344–1350, 1991.
- [13] C. Filiou, C. Galiotis, and D. N. Batchelder, “Residual stress distribution in carbon fibre/thermoplastic matrix pre-impregnated composite tapes,” *Composites*, vol. 23, no. 1, pp. 28–38, 1992.
- [14] W. K. Binienda and Y. Wang, “Residual Stresses Reduction in Filament Wound Composite Tubes,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 18, no. 8, pp. 684–701, May 1999.
- [15] J. Damour, “The Mechanics of Tension Control.” 2004.
- [16] K. P. Grenfell, “Tension Control Paper-Making and Converting Machinery,” *IEEE Transactions on Applications and Industry*, vol. 83, no. 73. pp. 234–240, 1964.
- [17] D. R. Roisum, “What is The Best Tension for My Product?” 2006.
- [18] Marathon Electric, “Certification Data Sheet,” 2016. [Online]. Available: http://dealerselectric.com/images/Products/marathon/Certification_056H17T5301.pdf.

[Accessed: 04-Sep-2017].

- [19] Cone Drive, “Series B Power Transmission Solutions.” [Online]. Available: <http://conedrive.com/wp-content/uploads/2016/07/Series-B.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [20] A. Francisco, *Motores Eléctricos*. ETEP, 2008.
- [21] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002.
- [22] Electrical4u, “Torque Equation of Three Phase Induction Motor.” [Online]. Available: <https://www.electrical4u.com/torque-equation-of-three-phase-induction-motor/>.
- [23] C. Hartman, “What is a Variable Frequency Drive?,” 2014. [Online]. Available: <http://www.vfds.com/blog/what-is-a-vfd>.
- [24] B. K. Bose, *Power electronics and variable frequency drives: technology and applications*. IEEE Press, 1997.
- [25] S. Peterson, “How to Choose the Right Control Method for VFDs.” [Online]. Available: <http://www.machinedesign.com/motorsdrives/how-choose-right-control-method-vfds>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [26] Carotron, “Motor Control Basics: Drive Operating Modes.” [Online]. Available: <http://www.carotron.com/applications/csag-d/>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [27] Kelvin Gear, “Reductor + MotorK200-GR63.xx.” [Online]. Available: <https://www.kelvingear.com/ftp/productsFiles/1368/MOVERICA-KELVIN-DUNKER-MOTORSPUR-K200+GR63x25.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [28] Faulhaber, “Motion Controller V2.5, 4-Quadrant PWM with RS232 or CAN interface,” 2017. [Online]. Available: https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_MCDC3006_V2_5_DFF.PDF. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [29] Avago Technologies, “HEDM-55xx/560x & HEDS-55xx/56xx Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders,” 2014. [Online]. Available: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1046EN>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [30] Mean Well, “120W Single Output Industrial DIN RAIL Power Supply DR-120 s e r i e s,” 2005. [Online]. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/260/DR-120-spec-1109610.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [31] SMC, “Compact Low Friction Cylinder (Metal Seal Type) Series MQQ Lateral Load Resisting Low Friction Cylinder (Metal Seal Type) Series MQM.” [Online]. Available: <http://www.smc-pneumatics.com/pdfs/smc/70AMQQ-MQM.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [32] SMC, “Series IR1200-A/2200-A/3200-A.” [Online]. Available: https://content2.smcetech.com/pdf/IR200A-A_EU.pdf. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [33] J. G. Webster, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Taylor & Francis, 1998.
- [34] TE connectivity, “E SERIES Economy Series AC LVDT,” 2017. [Online]. Available: http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FE-Series%7FA2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_E-Series_A2.pdf%7FCAT-LVDT0025. [Accessed: 04-Sep-2017].

- [35] Solartron Metrology and Ametek, “Displacement Sensors High Performance Displacement Transducers S Series.” .
- [36] MTS Sensors Group, “Magnetostriction - Basic Physical Elements.” [Online]. Available: http://www.mtssensors.de/fileadmin/medien/download/mts_measuringprinciple.pdf. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [37] Transducers Direct, “Introducing the TDMT-PAA Series High Resolution Magnetostrictive LDT In a Low Profile Package.” [Online]. Available: http://www.transducersdirect.com/wp-content/uploads/2016/09/TDMT-PAA_11.14.pdf. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [38] Banner, “Q4X Stainless Steel Analog Laser Sensor,” 2017. [Online]. Available: <http://info.bannerengineering.com/cs/groups/public/documents/literature/185623.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [39] Banner, “U-GAGE™ S18U Series Sensors with Analog Output,” 2016. [Online]. Available: <http://info.bannerengineering.com/cs/groups/public/documents/literature/110738.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [40] CREE, “Cree® 5mm Round LED C513A-WSS/WSN C513A-MSS/MSN,” 2015. [Online]. Available: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/C513A-WSN-WSS-MSN-MSS-1042.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [41] Honigmann, “RFS150 Radial force measuring axle,” 2017. [Online]. Available: <http://honigmann.com/bilder/download/TDE-RFS150-06.pdf>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [42] Honigmann, “Radial force measuring axle RFS® 150.” [Online]. Available: <http://honigmann.com/k7/g74/i64/c18/Tension-sensors-STATIONARY-Radial-force-measuring-axles-Radial-force-measuring-axle-RFS-150.html>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [43] C. M. C. T. de Pinho, “Sistemas Térmicos.” Departamento de Engenharia Mecânica, 2015.
- [44] National Instruments, “Serial Communication Overview,” 2012. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/2895/en/>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [45] ARC Electronics, “RS232 Data Interface a Tutorial on Data Interface and cables.” [Online]. Available: <http://www.arcelect.com/rs232.htm>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [46] L. Bies, “RS232 serial null modem cable wiring.” [Online]. Available: https://www.lammertbies.nl/comm/info/RS-232_null_modem.html. [Accessed: 04-Sep-2017].

Anexo A: Programação de Controlo PID da Placa de Desenvolvimento

```
void setup() {  
  
    pinMode(A0,INPUT); //Inicialização da porta de leitura da posição do cilindro  
  
    pinMode(7,OUTPUT); //Inicialização da porta de escrita da velocidade do motor  
  
    Serial.begin(9600); //Inicializar comunicação série, para ser usada com o PC para comunicar dados  
  
}  
  
  
//Posição  
  
int PosDes = 600; //Posição desejada do cilindro, mais ou menos a meio do percurso.  
  
float posCilindro = 600; //Para evitar uma medição de erro excessivo nas primeiras medições  
  
float med = 0; // somatorio para calcular o valor medio no filtro passa-baixo digital  
  
int iter = 200; //número de iterações para reduzir o ruído do sensor de posicao no filtro passa-baixo digital  
  
  
//erros  
  
double erroPosCilindro = 0; //inicializar com erro zero  
  
double erroPosCilindroAnt = 0; // "  
  
double erroInt = 0; // "  
  
double erroDer = 0; // "  
  
unsigned tempoAtual = millis(); // tempo atual no arrancar do programa  
  
unsigned tempoAnt; // vai ser usado no erro derivativo e integral  
  
  
//controlo  
  
double kProp = 0.3; //Constante de controlo propocional  
  
double kInt = 0; //Constante de controlo integral  
  
double kDer = 0; //Constante de controlo derivativo  
  
double acao; //acção de controlo resultante  
  
  
double pwm; //acção de controlo a enviar para o mcde
```

```
void loop() {
```

```
//MEDIR POSIÇÃO DO CILINDRO
```

```
med = 0;
```

```
/*Filtro passabaixo digital
```

```
Ao tirar um valor médio de um certo número de medições
```

```
de uma porta analógica, remove-se parte do ruído da medição
```

```
como fosse um filtro passabaixo composto por uma resistência e um condensador
```

```
*/
```

```
for (int i = 0; i <= iter; i++) {
```

```
    med = med + analogRead(A0);
```

```
}
```

```
posCilindro = (med/iter);
```

```
//Erros
```

```
//Para cálculo de erro derivativo e integral calcula-se o tempo entre dois ciclos do programa
```

```
tempoAnt = tempoAtual;
```

```
tempoAtual = millis();
```

```
erroPosCilindroAnt = erroPosCilindro;
```

```
//Prop - Diferença entre o desejado e a posição atual
```

```
erroPosCilindro = PosDes - posCilindro;
```

```
//Integral - área abaixo da curva do erro, igual a área anterior + o erro atual a multiplicar pelo tempo do ciclo
```

```
erroInt = erroInt + erroPosCilindro * (tempoAtual-tempoAnt) * 0.001;
```

```
//Derivativo - variação de posição entre corridas do ciclo, pelo tempo que demorou o ciclo.
```

```
erroDer = (erroPosCilindro - erroPosCilindroAnt)/((tempoAtual-tempoAnt)*0.001) ;
```

```
//Controlo
```

```
//A acção de controlo é o somatório das componentes propocionais, integrais e derivativas
```

```
acao = (erroPosCilindro*kProp + erroInt*kInt + erroDer*kDer);
```

```
/*127 = velocidade nula (pwm = 50%)
```

```
Uma acção nula corresponde ao motor parado, logoo pwm deve ser 127. */
```

```
pwm = int(127 + acao);
```

```
/*Saturação
```

```
Para valores superiores a 255, a placa de desenvolvimento reinicia o valor.
```

```
Isto é, 256 irá causar um pwm igual ao valor 0, 257 igual ao valor 1, etc.
```

```
É necessário evitar essa situação:
```

```
Controlo superior à velocidade máxima em qualquer umas das direcções
```

```
irá apenas provocar o motor rodar à velocidade máxima.
```

```
*/
```

```
if (pwm < 0)
```

```
{
```

```
    pwm = 0;
```

```
}
```

```
else if (pwm > 255)
```

```
{
```

```
    pwm = 255;
```

```
}
```

```
//Escrita
```

```
    analogWrite(7,pwm);
```

//Funções de Monitorização. Permite traçar gráficos para observar comportamento do sistema.

Serial.print(pwm);

Serial.print(",");

Serial.print(posCilindro);

Serial.print(",");

Serial.print(600);

Serial.println();

}

Anexo B: Programação MCDC

DI	;Desativa o motor
SOR2	;Configura o MCDC para controlo por PWM
SETTTL	;Configura o MCDC para 0 a 5V
A1	;Marcador 1
DI	;Desativa o motor
JPD2	;Se a porta lógica 4 (D) estiver ligada, salta para marcador 2
JMP1	;Salta para marcador 1
A2	;Marcador 2
EN	;Ativa o motor
JPD2	;Salta para o marcador 2 se a porta lógica estiver ligada
JMP1	;Salta para o marcador 1

Anexo C: Implementação de Função Anti-Windup

```
int erroIntMax = 1300;           //integral do erro em valor absoluto máximo de 1300
if (erroInt < -erroIntMax){      //Se o erro integral for inferior a -1300, tomará o valor -1300
    erroInt = -erroIntMax;
}
else if (erroInt > erroIntMax) {
    erroInt = erroIntMax;        //Se o erro integral for superior a 1300, tomará o valor 1300
}
```


Anexo D: Ficha Técnica do Motorreductor Utilizado

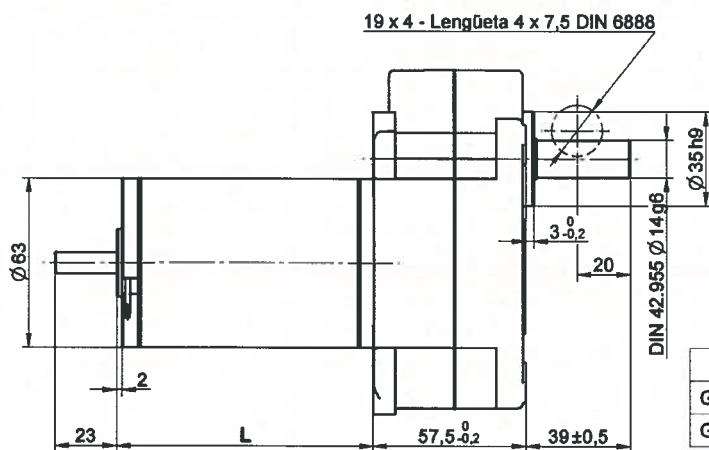
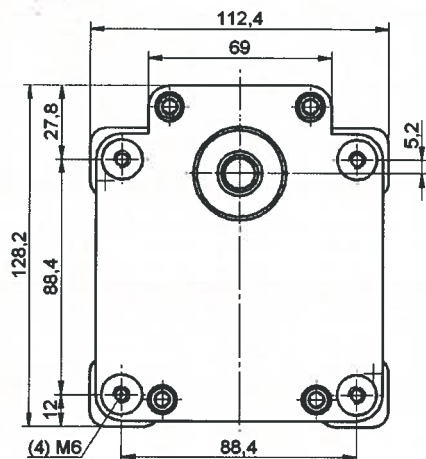


KELVIN
— A MOVERICA COMPANY —

www.kelvingear.com

Reductor + Motor

K200-GR63.xx



Tipo	L
GR63x25	95,6
GR63x55	125,6

K200-Fijación

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Reductor de gran resistencia mecánica para trabajo duro e intensivo en cualquier posición, a temperatura ambiente de -20 a 50°C, con par de utilización hasta 25 Nm, con carga uniforme.

- **Caja.** De aleación ligera inyectada, con fijación frontal por cuatro taladros roscados M6.
- **Reducción.** De engranajes helicoidales tallados, con piñones y ruedas de acero con tratamiento térmico superficial antifricción. El rodaje intermedio gira en rodamientos de bolas.
- **Eje de salida.** De acero, de Ø14 mm y 35 mm de longitud útil, con chavetero para lengüeta redonda DIN 6888 de 4 x 6,5 mm. Gira en rodamientos de bolas.
- **Carga axial:**
 - Dirección axial a la tracción 1.000 N ≈ 100 Kg.
 - Dirección axial al empuje 750 N ≈ 75 Kg.
 - Dirección radial, a 15 mm desde la caja 1.000 N ≈ 100 Kg.
- **Engrase.** Grasa Kluber, Staburags NBU 12/300.
- **Peso neto.** Con máximo número de pasos: 4,88 Kg.

ACOPLAMIENTO A MOTOR:


- **C. Continua:** tipo GR63x25, 12 V - 50 W ó 24 V - 50 W.
tipo GR63x55, 12 V - 100 W ó 24 V - 100 W.

■ OPCIONAL:

- Regulación de velocidad con variadores electrónicos PLN 1206 ó PLN 1212.

Evitar montar o desmontar ninguna pieza a golpes en el eje de salida, ya que podría dañar el reductor de forma irreparable.

Otras ejecuciones especiales, consultar.

			MOTORES DE C.C. Serie: GR63.xx											
			GR63x25 12 V			GR63x25 24 V			GR63x55 12 V			GR63x55 24 V		
Reducción $i = X:1$	Nº pasos	Eficiencia	Velocidad vacío Vo (r.p.m.)	Velocidad nominal Vn (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)	Velocidad vacío Vo (r.p.m.)	Velocidad nominal Vn (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)	Velocidad vacío Vo (r.p.m.)	Velocidad nominal Vn (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)	Velocidad vacío Vo (r.p.m.)	Velocidad nominal Vn (r.p.m.)	Par Nominal (Nm)
7,65	2	0,81	470,59	405,23	0,71	470,59	424,84	0,65	457,52	392,16	1,79	477,12	411,76	1,79
9,81	2	0,81	366,97	316,00	0,90	366,97	331,29	0,83	356,78	305,81	2,29	372,07	321,10	2,30
18,78	3	0,73	191,69	165,07	1,56	191,69	173,06	1,44	186,37	159,74	3,95	194,36	167,73	3,96
24,1	3	0,73	149,38	128,63	2,00	149,38	134,85	1,84	145,23	124,48	5,07	151,45	130,71	5,08
31,12	3	0,73	115,68	99,61	2,58	115,68	104,43	2,38	112,47	96,40	6,55	117,29	101,22	6,56
39,93	3	0,73	90,16	77,64	3,32	90,16	81,39	3,06	87,65	75,13	8,40	91,41	78,89	8,41
56,34	4	0,66	63,90	55,02	4,21	63,90	57,69	3,88	62,12	53,25	10,67	64,79	55,91	10,68
72,29	4	0,66	49,80	42,88	5,40	49,80	44,96	4,98	48,42	41,50	13,69	50,49	43,57	13,71
81,23	4	0,66	44,32	38,16	6,07	44,32	40,01	5,60	43,09	36,93	15,38	44,93	38,78	15,40
93,35	4	0,66	38,56	33,21	6,98	38,56	34,82	6,43	37,49	32,14	17,67	39,10	33,74	17,70
104,22	4	0,66	34,54	29,74	7,79	34,54	31,18	7,18	33,58	28,79	19,73	35,02	30,22	19,76
119,78	4	0,66	30,06	25,88	8,95	30,06	27,13	8,25	29,22	25,05	22,68	30,47	26,30	22,72
126,54	4	0,66	28,45	24,50	9,46	28,45	25,68	8,72	27,66	23,71	23,96	28,84	24,89	24,00
162,36	4	0,66	22,17	19,09	12,13	22,17	20,02	11,19	21,56	18,48		22,48	19,40	
199,38	5	0,59	18,06	15,55	13,41	18,06	16,30	12,36	17,55	15,05		18,31	15,80	
229,14	5	0,59	15,71	13,53	15,41	15,71	14,18	14,21	15,27	13,09	Ex	15,93	13,75	Ex
255,81	5	0,59	14,07	12,12	17,20	14,07	12,70	15,86	13,68	11,73	Ex	14,27	12,31	Ex
293,99	5	0,59	12,25	10,54	19,77	12,25	11,05	18,23	11,91	10,20	Ex	12,42	10,71	Ex
310,61	5	0,59	11,59	9,98	20,89	11,59	10,46	19,26	11,27	9,66	Ex	11,75	10,14	Ex
398,52	5	0,59	9,03	7,78	EX	9,03	8,16	24,71	8,78	7,53	Ex	9,16	7,90	Ex

Nota: Las relaciones en rojo son relaciones estándar

ATENCIÓN: Las velocidades pueden verse influenciadas por la carga hasta un -40%.

Ex

Excede el máximo
par admisible

CURVAS

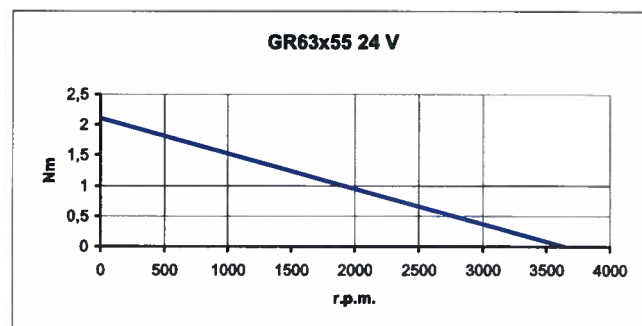
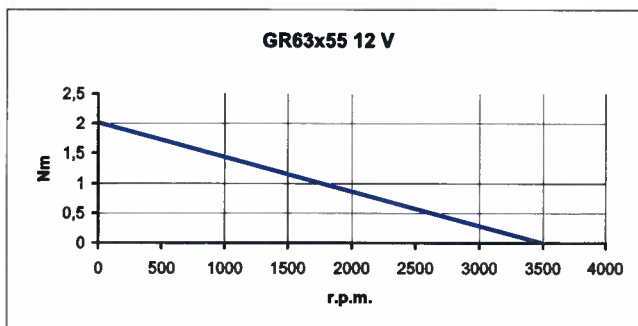
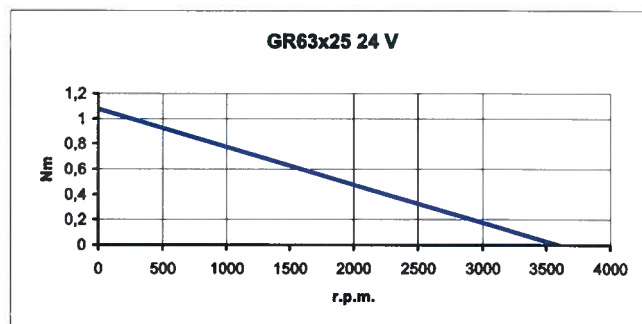
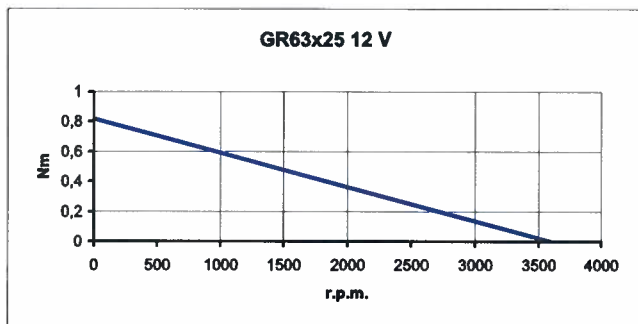
VELOCIDAD EN VACÍO/PAR NOMINAL

Motor GR63x25-12 V= 3.600 r.p.m./0,82 Nm.

Motor GR63x25-24 V= 3.600 r.p.m./1,08 Nm.

Motor GR63x55-12 V= 3.500 r.p.m./2,02 Nm.

Motor GR63x55-24 V= 3.650 r.p.m./2,11 Nm.



RECOMENDACIONES:

Nivel de ruido: el nivel de ruido del reductor depende de la uniformidad de la carga, ubicación (evitar resonancia) y de la velocidad; a menor velocidad, principalmente la del motor, menor nivel de ruido.

Par admisible: sobrepasar la carga máx. implica disminuir sensiblemente la vida del reductor.

Anexo E: Ficha Técnica do Driver Utilizado

Motion Controller

V2.5, 4-Quadrant PWM
with RS232 or CAN interface

For combination with:
DC-Micromotors

Series MCDC 3006

		MCDC 3006 S	
Power supply	U_B	12 ... 30	V DC
PWM switching frequency	f_{PWM}	78,12	kHz
Efficiency	η	95	%
Max. continuous output current ¹⁾	I_{dauer}	6	A
Max. peak output current	I_{max}	10	A
Total standby current	I_{el}	0,06	A
Speed range		5 ... 30 000	min ⁻¹
Scanning rate	N	100	μ s
External encoder resolution		$\leq 65\,535$	inc./rev.
Input/output (partially free configurable)		5	
Program memory: ²⁾			
– memory size		3,3	kWord
– Number of instructions		ca. 1 000	instructions
Operating temperature range		- 40 ... + 85	°C
Housing material		zinc, black coated	
Weight		160	g

¹⁾ at 22°C ambient temperature

²⁾ Only for version with serial interface

Connection information

Connection communication:				
Interface		RS232	CAN	
Communication profile		FAULHABER - ASCII	CANopen	
Max. transfer speed rate RS232		115 200		baud
Max. transfer speed rate CAN			1	Mbit/s
Connection 3 "AGND":				
– analog ground		analog GND		
– digital input external encoder		channel B		
	R_{in}	10		k Ω
	f	≤ 400		kHz
Connection 4 "Fault":				
– digital input	R_{in}	100		k Ω
– digital output (open collector)	U	$\leq U_B$		V
	I	≤ 30		mA
	clear	switched to GND		
	set	high-impedance		
	no error	switched to GND		
	error	high-impedance		
Connection 5 "AnIn":		"AGND" as GND		
– analog input set speed value	U_{in}	± 10		V
– digital input PWM set speed value	f	100 ... 2 000		Hz
	T	50% ± 0 min ⁻¹		
	external encoder	channel A		
	f	≤ 400		kHz
	f	≤ 400		kHz
	R_{in}	5		k Ω
Connection 6 "U_B":		U_B	12 ... 30	V DC
Connection 7 "GND":			ground	
Connection 8 "3. In":				
– digital input	R_{in}	22		k Ω
– electronic supply voltage	U_{EL}	12 ... 30		V DC
Connection 9 "5. In":				
– digital input	R_{in}	22		k Ω
Connection 10 "4. In":				
– digital input	R_{in}	22		k Ω

Connection information

Connection 11-12 "Ch A", "Ch B":			
Encoder input	CH A CH B		encoder channel A encoder channel B
Integrated pullup resistance + 5V	R f	2,2 ≤ 400	k Ω kHz
Connection 13 "Ucc":			
Output voltage for external use ¹⁾	U_{out}	5	V
Load current	I_{out}	≤ 60	mA
Connection 14 "SGND":			
Signal GND			signal ground
Connection 15-16 "Mot +", "Mot -":			
Motor connection	Mot + Mot -	Motor + Motor -	
PWM switching frequency	U_{out} f_{PWM}	0 ... U_B 78,12	V DC kHz

¹⁾ E.g. encoder

The signal level (PLC or TTL) of the digital inputs can be set over the interface (see operating instruction manual).

Standard (PLC): Low 0...7V / High 12,5V... U_B , TTL: Low 0...0,5V / High 3,5V... U_B

D-SUB-connector information

Connection D-SUB-connector:		RS232	CAN
Pin 2	RxD		CAN-L
Pin 3	TxD		GND
Pin 5	GND		-
Pin 7	-		CAN-H

Options

- Separate power supply (Option no.: 3085)

Accessories

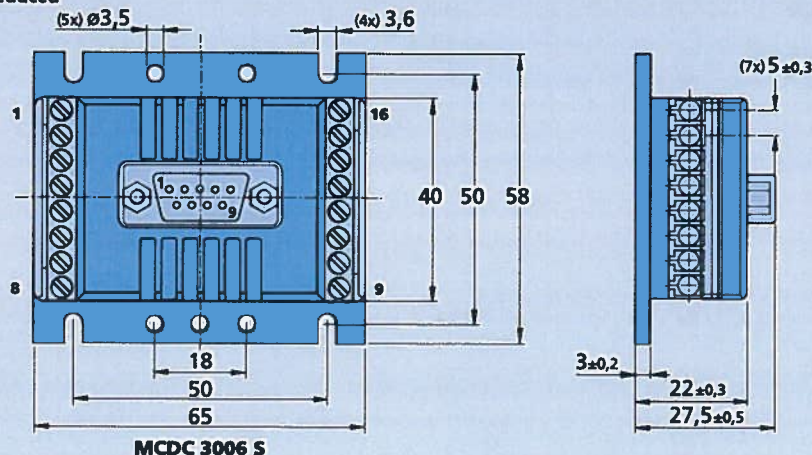
To view our large range of accessory parts, please refer to the "Accessories" chapter.

Full product description

- Example:
MCDC 3006 S RS (RS232)
MCDC 3006 S CF (CANopen with FAULHABER CAN)
MCDC 3006 S CO (CANopen CiA)

Dimensional drawing and connection information MCDC 3006 S

Scale reduced



Supply connection

No.	Function
1	TxD / CAN_H
2	RxD / CAN_L
3	AGND
4	Fault
5	AnIn
6	U_B
7	GND
8	3. In

Motor connection

No.	Function
9	5. In
10	4. In
11	Ch A
12	Ch B
13	Ucc
14	SGND
15	Mot +
16	Mot -

Anexo F: Ficha Técnica da Fonte de Alimentação Utilizada



■ Features :

- AC input range selectable by switch
- Protections: Short circuit/Over load/Over voltage/Over temperature
- Cooling by free air convection
- Can be installed on DIN rail TS-35/7.5 or 15
- UL 508(industrial control equipment)approved
- LED indicator for power on
- 100% full load burn-in test
- Fixed switching frequency at 55KHz
- 3 years warranty

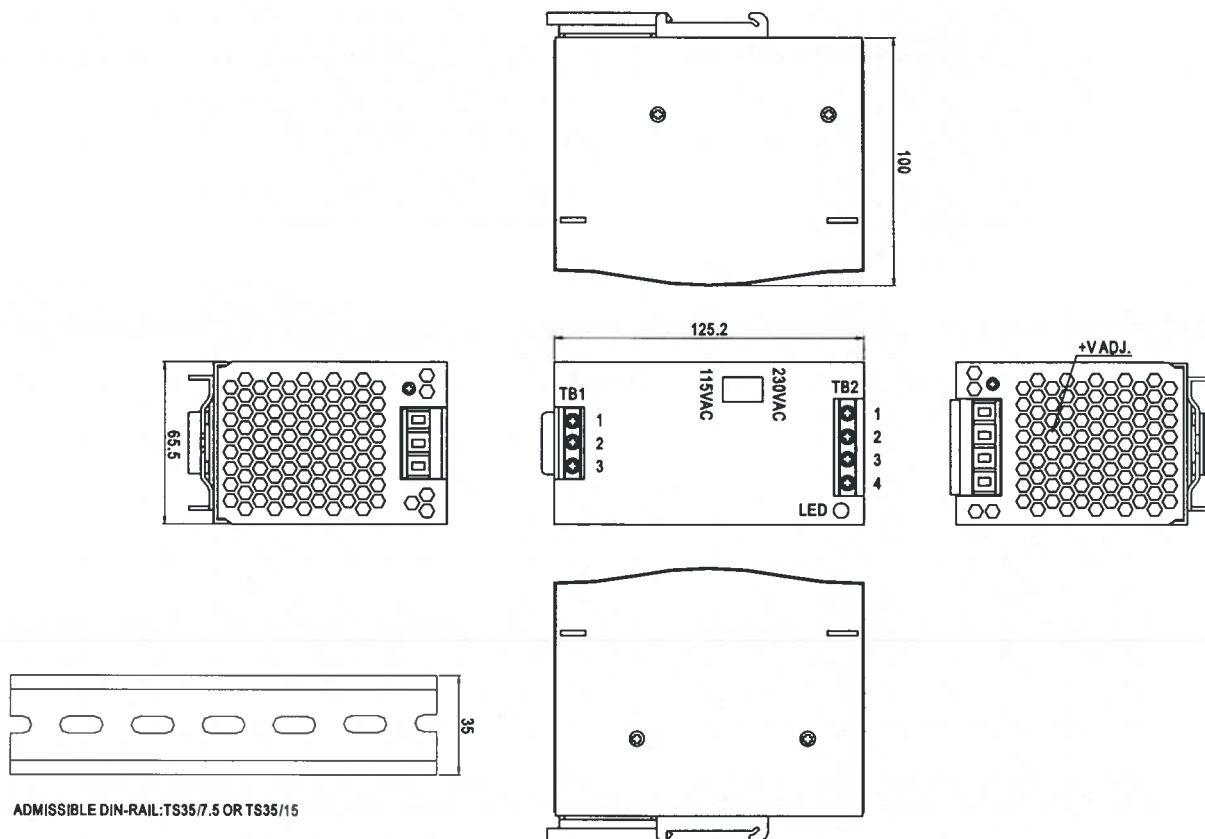


SPECIFICATION

MODEL		DR-120-12	DR-120-24	DR-120-48
OUTPUT	DC VOLTAGE	12V	24V	48V
	RATED CURRENT	10A	5A	2.5A
	CURRENT RANGE	0 ~ 10A	0 ~ 5A	0 ~ 2.5A
	RATED POWER	120W	120W	120W
	RIPPLE & NOISE (max.) <small>Note.2</small>	80mVp-p	80mVp-p	100mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	12 ~ 14V	24 ~ 28V	48 ~ 53V
	VOLTAGE TOLERANCE <small>Note.3</small>	±2.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	SETUP, RISE TIME	500ms, 70ms/230VAC 500ms, 70ms/115VAC at full load		
HOLD TIME (Typ.)	36ms/230VAC 32ms/115VAC at full load			
INPUT	VOLTAGE RANGE	88 ~ 132VAC/176 ~ 264VAC by switch 248 ~ 370VDC		
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz		
	EFFICIENCY (Typ.)	80%	84%	85%
	AC CURRENT (Typ.)	2.6A/115VAC 1.6A/230VAC		
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 20A/115VAC 40A/230VAC		
	LEAKAGE CURRENT	<3.5mA / 240VAC		
PROTECTION	OVER LOAD	105 ~ 150% rated output power Protection type : Constant current limiting, recovers automatically after fault condition is removed		
	OVER VOLTAGE	15 ~ 16.5V	29 ~ 33V	58 ~ 65V
	OVER TEMPERATURE	85°C ±5°C (TSW1)	90°C ±5°C (TSW1)	90°C ±5°C (TSW1)
		Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover		
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-10 ~ +60°C (Refer to output load derating curve)		
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing		
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-20 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH		
	TEMP. COEFFICIENT	±0.03%/°C (0 ~ 50°C)		
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 2G 10min./1cycle, 60min. each along X, Y, Z axes		
SAFETY & EMC <small>(Note 4)</small>	SAFETY STANDARDS	UL508, UL60950-1, TUV EN60950-1 Approved		
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:3KVAC I/P-FG:1.5KVAC O/P-FG:0.5KVAC		
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms/500VDC		
	EMI CONDUCTION & RADIATION	Compliance to EN55011,EN55022 (CISPR22) Class B		
	HARMONIC CURRENT	Compliance to EN61000-3-2,-3		
	EMS IMMUNITY	Compliance to EN61000-4-2,3,4,5,6,8,11, ENV50204, EN55024, EN61000-6-2 (EN50082-2) Heavy industry level, criteria A		
OTHERS	MTBF	136.8Khrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)		
	DIMENSION	65.5*125.2*100mm (W*H*D)		
	PACKING	0.79Kg; 20pcs/16.5Kg/1.1CUFT		
NOTE	1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives.			

Mechanical Specification

Case No. 921A Unit:mm



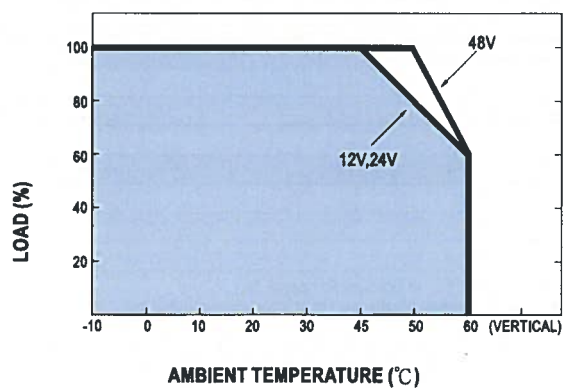
Terminal Pin. No Assignment (TB1)

Pin No.	Assignment
1	FG ⊕
2	AC/N
3	AC/L

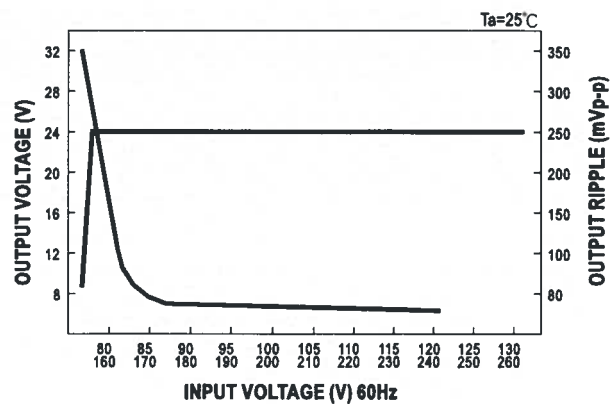
Terminal Pin. No Assignment (TB2)

Pin No.	Assignment
1,2	DC OUTPUT +V
3,4	DC OUTPUT -V

Output Derating



Static Characteristics (24V)



Anexo G: Catálogo do Cilindro Pneumático Utilizado

Compact Low Friction Cylinder (Metal Seal Type)

Series **MQQ**

ø10, ø16, ø20, ø25, ø28

Lateral Load Resisting Low Friction Cylinder (Metal Seal Type)

Series **MQM**

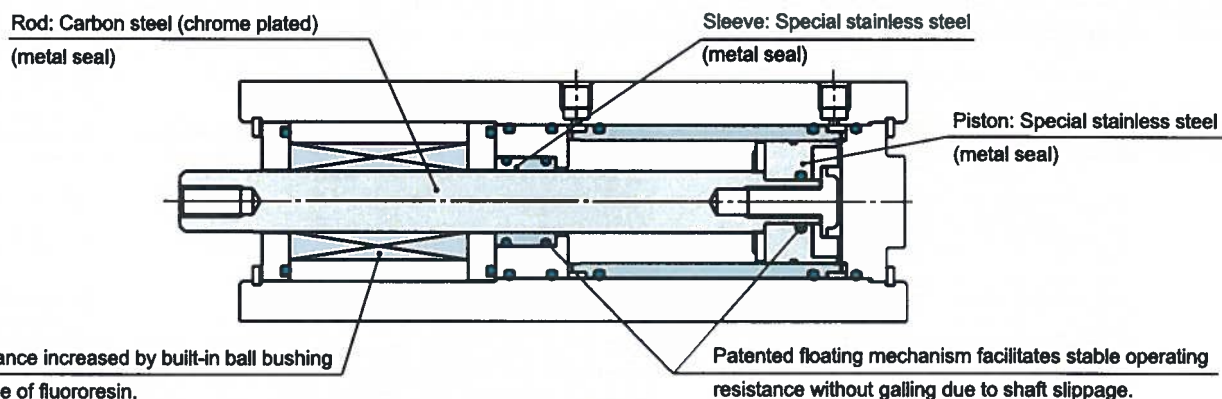
ø6, ø10, ø16, ø20, ø25



Low Friction Cylinder (Metal Seal Type)

Series MQQ / $\varnothing 10, \varnothing 16, \varnothing 20, \varnothing 25, \varnothing 28$
Series MQM / $\varnothing 6, \varnothing 10, \varnothing 16, \varnothing 20, \varnothing 25$

Metal seal construction with low operating resistance allows actuation in speed



Low breakaway pressure

Minimal operating resistance allows low pressure actuation at 0.005MPa.

* Contact SMC regarding vacuum applications.

Long life

Long life of 10,000km or 100 million full cycles.

Low friction

Low operating resistance and high stability allow force control as low as 0.05N.

(Based on cylinder Piston area x Pressure accuracy)

No increased operating resistance after periods of non-operation.

Low & uniform speed actuation

Smooth, uniform speed actuation ranges as low as 0.3mm/s.

Series Variations

Series MQQ

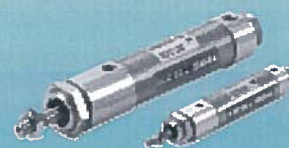
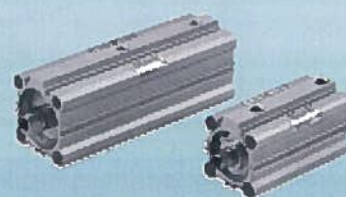
Compact low friction cylinders designed for low pressure, low speed, uniform speed or low friction applications

Series	Bore size (mm)	Stroke (mm)								Operating pressure range (MPa)	Actuation speed (mm/s)
		10	20	30	40	50	60	75	100		
MQQT Standard type	10	●	●	●	●	●	●			0.005 to 0.5	0.3 to 300
	16	●	●	●	●	●	●				
MQQL Lateral load resisting type (built-in ball bushing)	20	●	●	●	●	●	●			0.005 to 0.7	0.5 to 500
	25	●	●	●	●	●	●	●	●		
	28	●	●	●	●	●	●	●	●		

Series MQM

Lateral load resisting low friction cylinders for low pressure, low speed, uniform speed, low friction high pressure, high speed and high speed response (high frequency) actuation

Series	Bore size (mm)	Stroke (mm)						Operating pressure range (MPa)	Actuation speed (mm/s)
		15	30	45	60	75	100		
MQML Standard type	6 (standard only)	●	●	●	●	●	●	$\varnothing 6$: 0.02 to 0.7 $\varnothing 10$ to $\varnothing 25$: 0.005 to 0.7	0.5 to 1000
	10	●	●	●	●	●	●		
	16	●	●	●	●	●	●	0.01 to 0.7	5 to 3000
MQML□□H High speed/frequency	20	●	●	●	●	●	●		
	25	●	●	●	●	●	●		



High speed, high frequency actuation

H type achieves speeds up to 3,000mm/s (without fixed orifice),
and continuous actuation up to 50 cpm. (MQML□□H)

Control output control ranges impossible for ordinary cylinders.

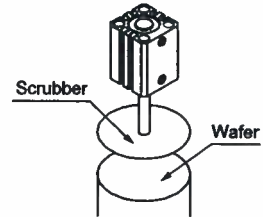
Lateral load resistance

Lateral load resistance is
increased by a built-in ball bushing.
(MQQL/MQML)

Application examples

Pressure control with
fine pressure variations

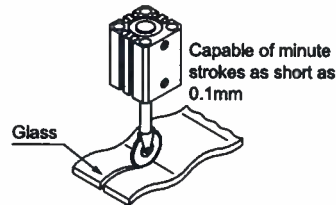
Applicable models: **MQQT/MQML**



Polishing of wafers

Cutting of glass and lenses,
requiring constant force

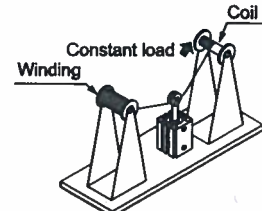
Applicable models: **MQQL/MQML**



Cutting of
wavy surfaces

Tension control responding
to very low pressure and
minute pressure variations

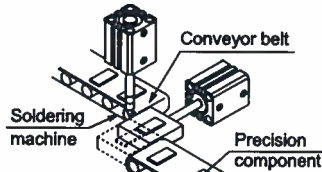
Applicable models: **MQQL/MQML**



Coil winding

Transfer of precision
components, etc., that require
low or uniform speed actuation

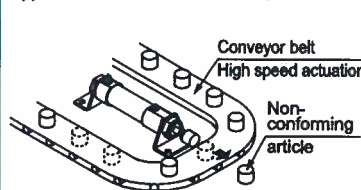
Applicable models: **MQQT/MQML**



Transfer of
precision components

Elimination of non-conforming
articles requiring high speed
actuation

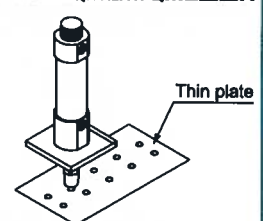
Applicable models: **MQML/MQML□□H**



Elimination of
non-conforming articles

Punching operations requiring
high frequency actuation

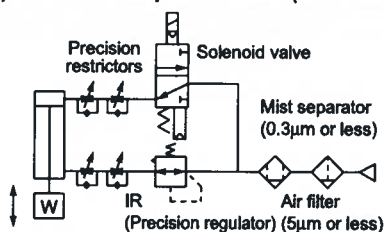
Applicable models: **MQML/MQML□□H**



Punching

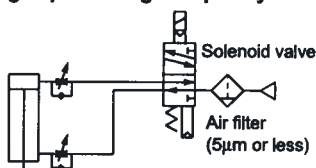
Recommended circuit examples

Example 1) Uniform & low speed actuation (no control of cylinder output)



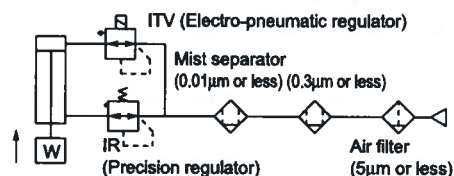
* When using a solenoid valve, use a metal seal type (series VQ, VQZ, SQ, etc.).

Example 3) High speed & high frequency actuation



* When using a solenoid valve, use a metal seal type (series VQ, VQZ, SQ, etc.).

Example 2) Low speed with output control



* When performing control of cylinder output, do not create a restriction circuit using a speed controller, etc. Pressure inside the cylinder will drop and control will become impossible. Always control actuation by means of pressure control.

Applications based on low friction specification

- 1) Operating resistance will vary with an offset load. Be sure to properly align the rod axis with the load and direction of movement when connecting. When an offset load is expected, provide a suitable mechanism such as a floating joint.
- 2) Use clean air (atmospheric pressure dew point temperature -10°C or less). Use of a series AM mist separator (filtration rating of 0.3μm or less), or series AM + AMD (filtration rating of 0.01μm or less) is recommended.

Metal Seal

Compact Low Friction Cylinder

Series *MQQ*

ø10, ø16, ø20, ø25, ø28

How to Order

MQQ T B 10 - 10 D

Compact low friction specification

T	Standard type
L	Lateral load resisting type (built-in ball bushing)

Type

Mounting

B	Through hole & double end tapped (standard)
L	Foot type
F	Front flange type
G	Rear flange type
D (Note)	Double clevis type

Note) Available only for MQQL□.

* Mounting brackets are included when shipped, but are not assembled.

Bore size

10	10mm
16	16mm
20	20mm
25	25mm
28	28mm

Cylinder stroke

Bore size (mm)	Standard stroke (mm)
10	10, 20, 30, 40
16	10, 20, 30, 40, 50, 60
20	10, 20, 30, 40, 50, 60
25	10, 20, 30, 40, 50, 75, 100
28	10, 20, 30, 40, 50, 75, 100

* Strokes are available in 1mm increments by installing spacers in standard stroke cylinders.

Action

D	Double acting
----------	---------------

Body option

NH	Standard (rod end female thread)
M (Note)	Rod end male thread

Note) A rod end thread adapter is attached.



* Series MQQ is not auto switch capable.

Mounting Bracket Part Numbers

Bore size (mm)	Foot (Note 1)	Flange	Double clevis	Rod end thread adapter (with nut)
10	CQS-L016	CQS-F016	CQS-D016	MQ10-M
16	CQS-L020	CQS-F020	CQS-D020	MQ16-M
20	CQS-L025	CQS-F025	CQS-D025	MQ20-M
25	CQ-L032	CQ-F032	CQ-D032	MQ25-M
28	CQ-L040	CQ-F040	CQ-D040	MQ28-M

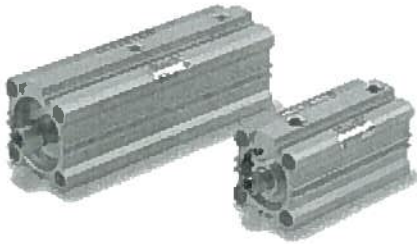
Note 1) When ordering foot brackets, order 2 pcs. for each cylinder.

Note 2) The following parts are included with the respective brackets.

Foot, Flange Body mounting bolts

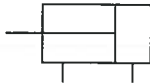
Double clevis Clevis pin, C type snap ring for shaft, Body mounting bolts

Specifications/Standard Type: MQQT



Symbol

Double acting: Single rod



Bore size (mm)		10	16	20	25	28
Seal construction		Metal seal				
Action		Double acting single rod				
Fluid		Air				
Proof pressure		1.05MPa				
Maximum operating pressure		0.5MPa				
Minimum operating pressure ^{Note 1)}		0.005MPa				
Ambient and fluid temperature		-10 to 80°C				
Cushion		Rubber bumper (standard)				
Lubrication ^{Note 2)}		Not required (non-lube)				
Rod end thread		Female thread				
Rod end thread tolerance		JIS class 2				
Stroke length tolerance		+1.0 0				
Piston speed ^{Note 3)}		0.3 to 300mm/s (Refer to page 23.)				
Total allowable leakage	Supply pressure 0.1MPa	150cm³/min or less	200cm³/min or less	300cm³/min or less		
	Supply pressure 0.3MPa	800cm³/min or less	1000cm³/min or less	1200cm³/min or less		
	Supply pressure 0.5MPa	1500cm³/min or less	2000cm³/min or less	3000cm³/min or less		

Note 1) Use clean, dry air with no freezing.

Note 2) Refer to precautions on page 21 regarding lubrication.

Note 3) Control low speed actuation with differential pressure and a speed controller, etc.
(Refer to recommended circuit examples for further details.)

Specifications/Lateral Load Resisting Type: MQQL

Bore size (mm)		10	16	20	25	28
Seal construction		Metal seal				
Action		Double acting single rod				
Fluid		Air				
Proof pressure		1.05MPa				
Maximum operating pressure		0.7MPa				
Minimum operating pressure ^{Note 1)}		0.005MPa				
Ambient and fluid temperature		-10 to 80°C				
Cushion		Rubber bumper (standard)				
Lubrication ^{Note 2)}		Not required (non-lube)				
Rod end thread		Female thread				
Rod end thread tolerance		JIS class 2				
Stroke length tolerance		+1.0 0				
Piston speed ^{Note 3)}		0.5 to 500mm/s (Refer to page 23.)				
Total allowable leakage	Supply pressure 0.1MPa	150cm³/min or less	200cm³/min or less	300cm³/min or less		
	Supply pressure 0.3MPa	800cm³/min or less	1000cm³/min or less	1200cm³/min or less		
	Supply pressure 0.5MPa	1500cm³/min or less	2000cm³/min or less	3000cm³/min or less		

Note 1) Use clean, dry air with no freezing.

Note 2) Refer to precautions on page 21 regarding lubrication.

Note 3) Control low speed actuation with differential pressure and a speed controller, etc.
(Refer to recommended circuit examples for further details.)

Weights/Standard Type: MQQT

Unit: g

Bore size (mm)	Cylinder stroke (mm)							
	10	20	30	40	50	60	75	100
10	94	118	142	166	—	—	—	—
16	166	206	246	286	326	366	—	—
20	228	290	352	414	476	538	—	—
25	395	487	579	671	763	—	993	1223
28	661	799	937	1075	1213	—	1558	1903

Weights/Lateral Load Resisting Type: MQQL (Built-in Ball Bushing)

Unit: g

Bore size (mm)	Cylinder stroke (mm)							
	10	20	30	40	50	60	75	100
10	148	172	196	220	—	—	—	—
16	284	324	364	404	444	484	—	—
20	383	445	507	569	631	693	—	—
25	552	644	736	828	920	—	1150	1380
28	965	1103	1241	1379	1517	—	1862	2207

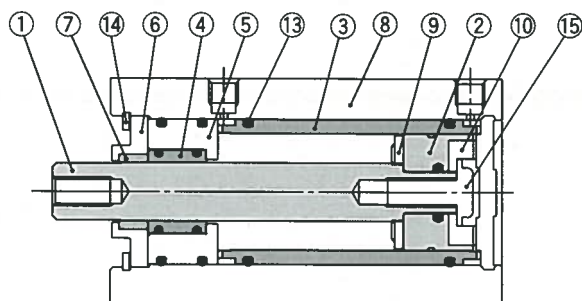
Theoretical Output

Bore size (mm)	Rod size (mm)	Direction	Piston area (mm²)	Operating pressure (MPa)							Unit: N
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
10	6	IN	50.3	5.0	10.1	15.1	20.1	25.2	30.2	35.2	
		OUT	78.5	7.9	15.7	23.6	31.4	39.3	47.1	55.0	
16	8	IN	145.8	14.9	29.2	43.7	58.3	72.9	87.5	102.1	
		OUT	196.1	19.6	39.2	58.9	78.4	98.1	117.7	137.3	
20	10	IN	235.6	23.6	47.1	70.7	94.2	117.8	141.4	164.9	
		OUT	314.2	31.4	62.8	94.3	125.7	157.1	188.5	219.9	
25	12	IN	377.8	37.8	75.6	113.3	151.1	188.9	226.7	262.5	
		OUT	490.9	49.1	98.2	147.3	196.4	245.5	294.5	343.6	
28	16	IN	423.5	42.4	84.7	127.1	169.4	211.8	254.1	296.5	
		OUT	624.6	62.5	124.9	187.4	249.8	312.3	374.8	437.2	

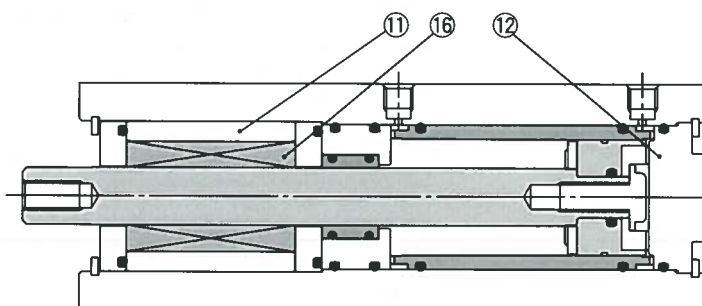
Series MQQ

Construction

Standard type/MQQT



Lateral load resisting type/MQQL (built-in ball bushing)



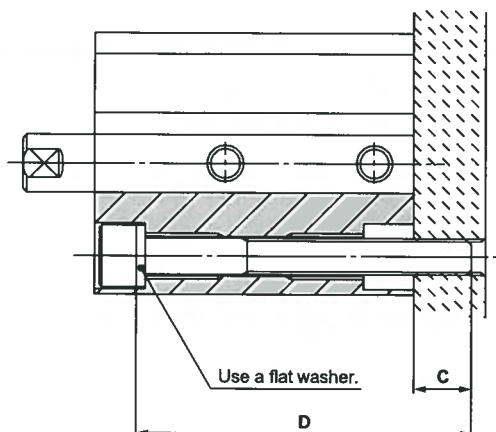
Parts list

No.	Description	Material	Note
1	Rod	Carbon steel	Hard chrome plated
2	Piston	Special stainless steel	
3	Liner	Special stainless steel	
4	Sleeve	Special stainless steel	
5	Sleeve retainer	Aluminum alloy	
6	Plate	Aluminum alloy	Hard anodized
7	Guide	Fluororesin	
8	Cylinder tube	Aluminum alloy	Hard anodized
9	Bumper A	Polyurethane	
10	Bumper B	Polyurethane	
11	Bushing	Aluminum alloy	
12	Bottom plate	Aluminum alloy	Hard anodized
13	O-ring	NBR	
14	Retaining ring	Carbon tool steel	Nickel plated
15	Bolt	Carbon tool steel	Nickel plated
16	Ball bushing		

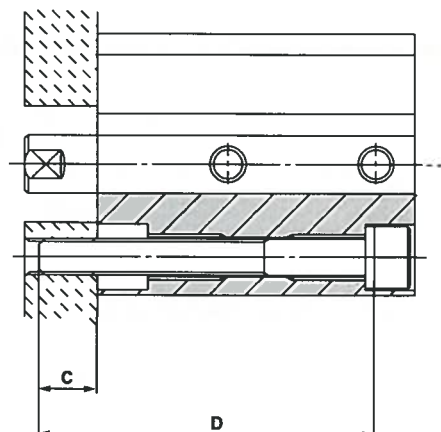
Mounting

Mounting bolts

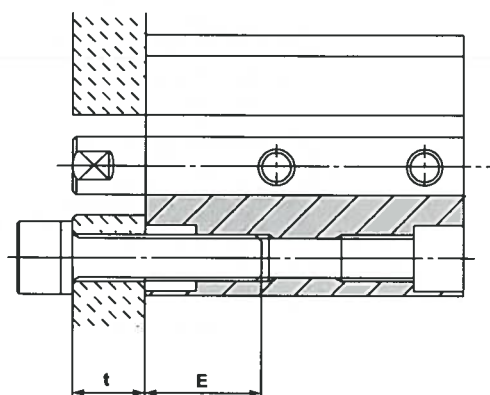
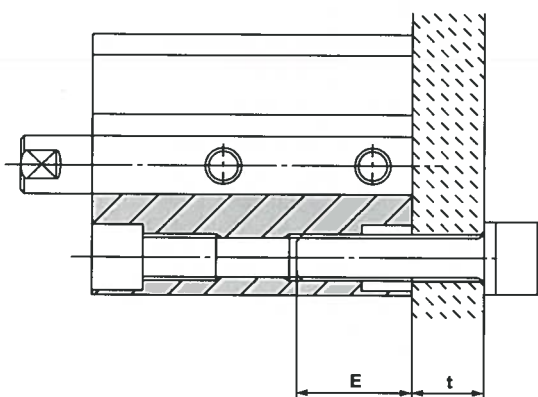
a) A type mounting (when using the mounting plate threads)



Note) Be sure to use a flat washer for the A type mounting.



b) B type mounting (when using the cylinder tube threads)



Compatible mounting bolt dimensions

Model		A type mounting			B type mounting	
		Mounting bolt size	C (mm)	D: Bolt length (mm)	Mounting bolt size	E (mm)
Standard type MQQT	MQQTB10-□D	M3 x 0.5	7	35 + Stroke	M4 x 0.7	8 to 11
	MQQTB16-□D	M5 x 0.8	7	35 + Stroke	M6 x 1	13 to 17
	MQQTB20-□D		8.5	40 + Stroke		
	MQQTB25-□D		9	45 + Stroke		
	MQQTB28-□D		7.5	50 + Stroke		
Lateral load resisting type MQQL (built-in ball bushing)	MQQLB10-□D	M3 x 0.5	7	65 + Stroke	M4 x 0.7	8 to 11
	MQQLB16-□D	M5 x 0.8	5.5	70 + Stroke	M6 x 1	13 to 17
	MQQLB20-□D		8	80 + Stroke		
	MQQLB25-□D		6.5	85 + Stroke		
	MQQLB28-□D		7	105 + Stroke		

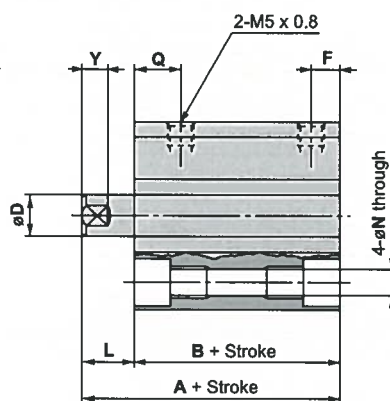
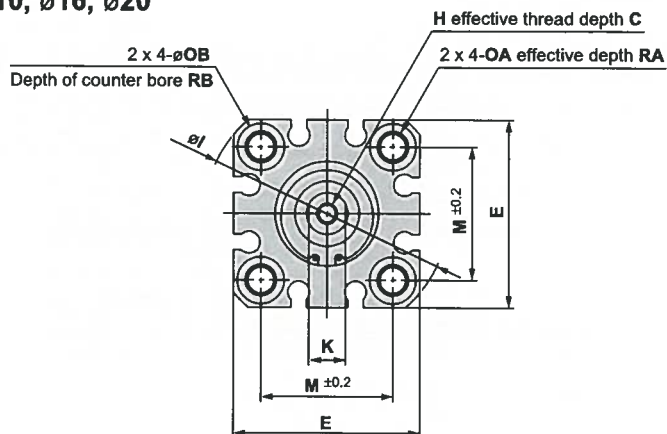
□: Stroke

Series MQQ

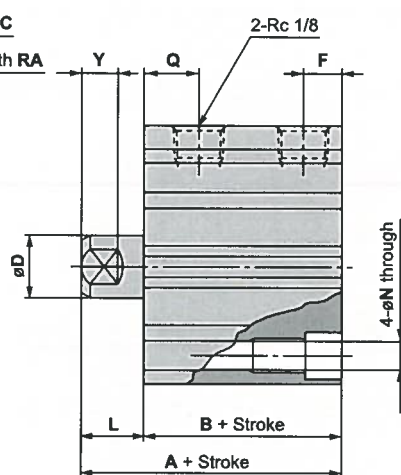
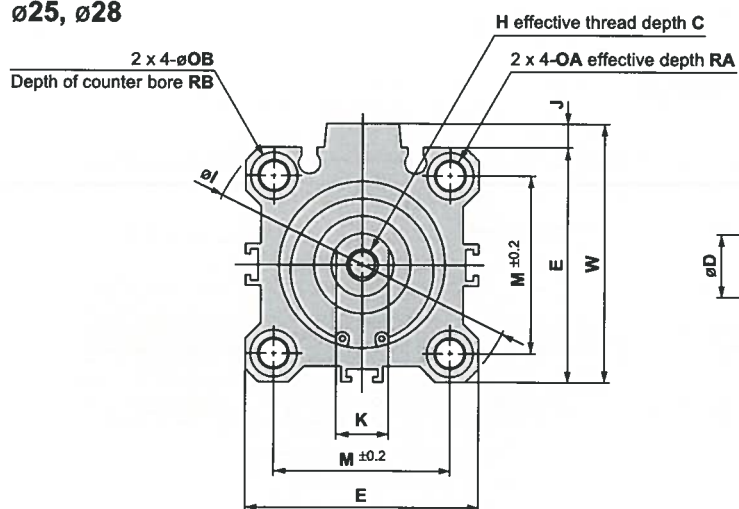
Dimensions

Standard type (through hole and double end tapped)/MQQTB

ø10, ø16, ø20



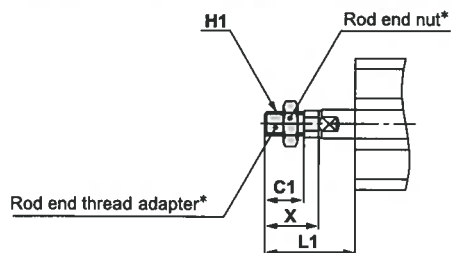
ø25, ø28



Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	C	D	E	F	H	I	J	K	L	M	N	OA	OB	Q	RA	RB	W	Y
10	10 to 40	39.5	31.5	6	6	29	5.5	M3 x 0.5	38	—	5	8	20	3.5	M4 x 0.7	6.5	14.5	7	4	—	5
16	10 to 60	44	34	8	8	36	5.5	M4 x 0.7	47	—	7	10	25.5	5.4	M6 x 1.0	9	18	10	7	—	5
20	10 to 60	47.5	37.5	10	10	40	5.5	M5 x 0.8	52	—	8	10	28	5.4	M6 x 1.0	9	19.5	10	7	—	6
25	10 to 50, 75, 100	54	42	12	12	45	8.5	M6 x 1.0	60	4.5	10	12	34	5.5	M6 x 1.0	9	23	10	7	49.5	7
28	10 to 50, 75, 100	60.5	48.5	13	16	52	8.5	M8 x 1.25	69	5	14	12	40	5.5	M6 x 1.0	9	26	10	7	57	10

(mm)

With rod end male thread/MQQ□-□DM

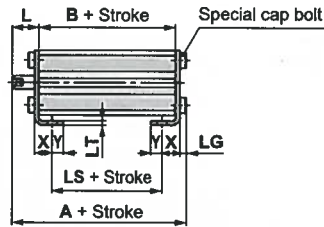
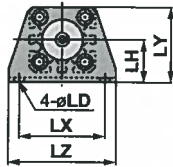


Bore size (mm)	L1	C1	H1	X
10	23.5	10.5	M5 x 0.8	15.5
16	26.5	11.5	M6 x 1.0	16.5
20	28.5	13.5	M8 x 1.25	18.5
25	34.5	16.5	M10 x 1.25	22.5
28	40.5	22.5	M14 x 1.5	28.5

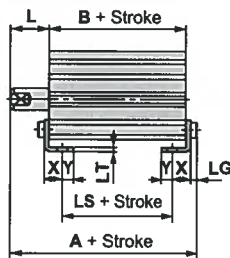
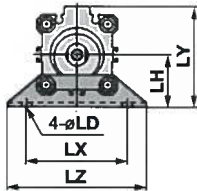
(mm)

* Refer to page 9 for details regarding the rod end thread adapter and rod end nut.

Foot type/MQQTL
ø10, ø16, ø20



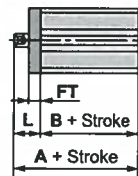
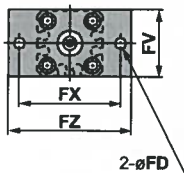
ø25, ø28



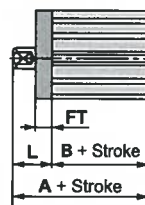
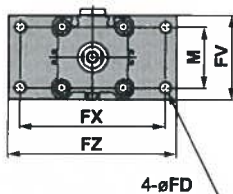
Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	L	LD	LG	LH
10	10 to 40	44.3	31.5	8	4.5	2.8	19
16	10 to 60	51.2	34	10	6.6	4	24
20	10 to 60	54.7	37.5	10	6.6	4	26
25	10 to 50,75,100	61.2	42	12	6.6	4	30
28	10 to 50,75,100	67.7	48.5	12	6.6	4	33

Bore size (mm)	LS	LT	LX	LY	LZ	X	Y
10	19.5	2	38	33.5	48	8	5
16	22	3.2	48	42	62	9.2	5.8
20	22.5	3.2	52	46	66	10.7	5.8
25	26	3.2	57	57	71	11.2	5.8
28	32.5	3.2	64	64	78	11.2	7

Front flange type/MQQTf
ø10, ø16, ø20



ø25, ø28

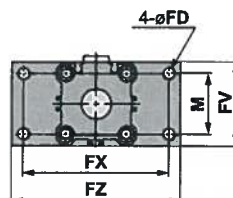
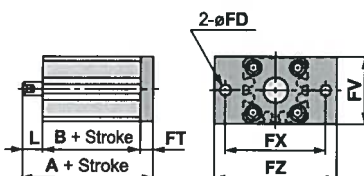


Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	FD	FT	FV	FX
10	10 to 40	49.5	31.5	4.5	5.5	30	45
16	10 to 60	54	34	6.6	8	39	48
20	10 to 60	57.5	37.5	6.6	8	42	52
25	10 to 50,75,100	64	42	5.5	8	48	56
28	10 to 50,75,100	70.5	48.5	5.5	8	54	62

Bore size (mm)	FZ	L	M
10	55	18	—
16	60	20	—
20	64	20	—
25	65	22	34
28	72	22	40

Rear flange type/MQQTg
ø10, ø16, ø20

ø25, ø28



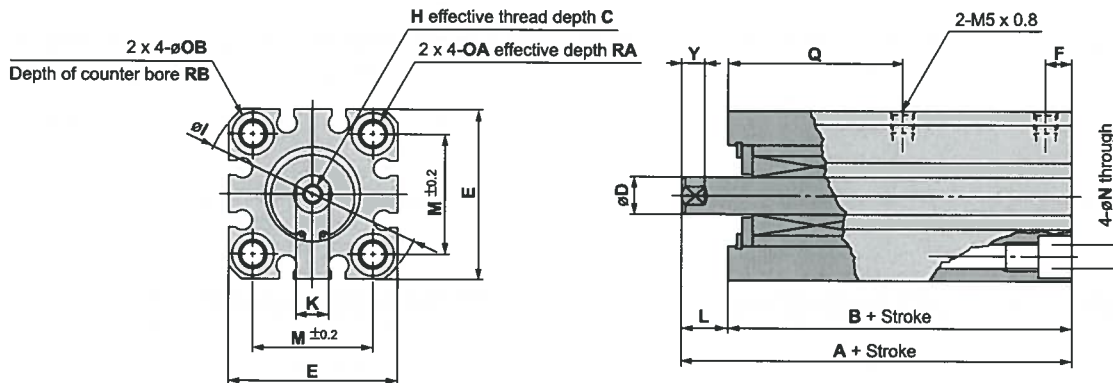
Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	L
10	10 to 40	45	8
16	10 to 60	52	10
20	10 to 60	55.5	10
25	10 to 50,75,100	62	12
28	10 to 50,75,100	68.5	12

(Dimensions other than A and L are the same as the front flange type.)

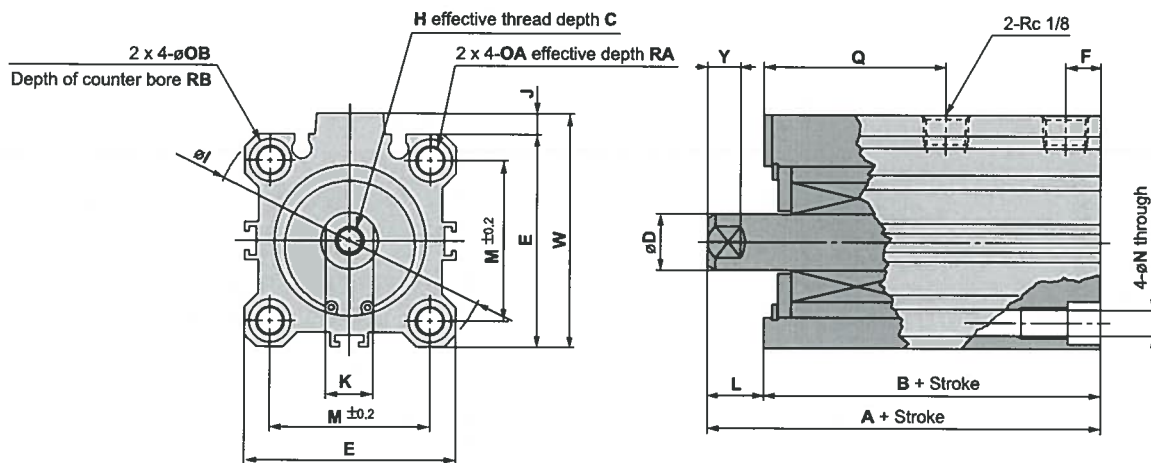
Series MQQ

Dimensions

Lateral load resisting type (through hole and double end tapped)/MQQLB $\varnothing 10$, $\varnothing 16$, $\varnothing 20$

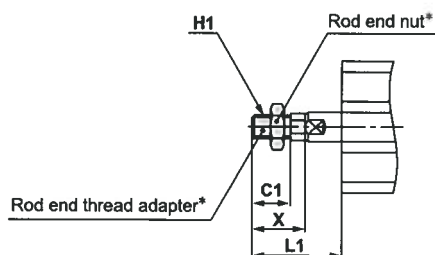


$\varnothing 25$, $\varnothing 28$



Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	C	D	E	F	H	I	J	K	L	M	N	OA	OB	Q	RA	RB	W	Y
10	10 to 40	69.5	61.5	6	6	29	9	M3 x 0.5	38	—	5	8	20	3.5	M4 x 0.7	6.5	39.5	7	4	—	5
16	10 to 60	80.5	70.5	8	8	36	11.5	M4 x 0.7	47	—	7	10	25.5	5.4	M6 x 1.0	9	48.5	10	7	—	5
20	10 to 60	89	79	10	10	40	12	M5 x 0.8	52	—	8	10	28	5.4	M6 x 1.0	9	55	10	7	—	6
25	10 to 50, 75, 100	96.5	84.5	12	12	45	13.5	M6 x 1.0	60	4.5	10	12	34	5.5	M6 x 1.0	9	58	10	7	49.5	7
28	10 to 50, 75, 100	116	104	13	16	52	17.5	M8 x 1.25	69	5	14	12	40	5.5	M6 x 1.0	9	71	10	7	57	10

With rod end male thread/MQQ□□DM

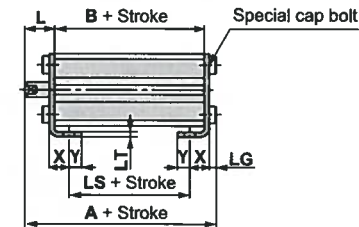
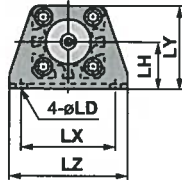


Bore size (mm)	L1	C1	H1	X
10	23.5	10.5	M5 x 0.8	15.5
16	26.5	11.5	M6 x 1.0	16.5
20	28.5	13.5	M8 x 1.25	18.5
25	34.5	16.5	M10 x 1.25	22.5
28	40.5	22.5	M14 x 1.5	28.5

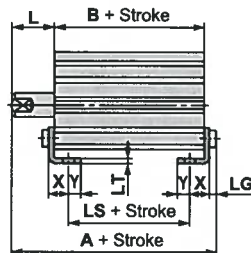
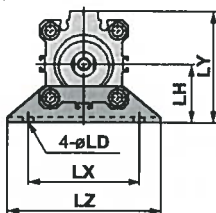
* Refer to page 9 for details regarding the rod end thread adapter and rod end nut.

Foot type/MQQLL

ø10, ø16, ø20

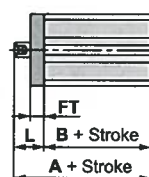
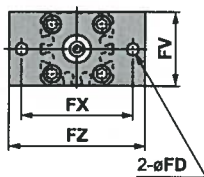


ø25, ø28

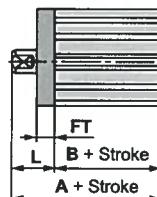
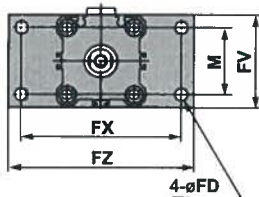


Front flange type/MQQLF

ø10, ø16, ø20

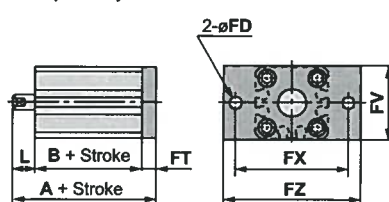


ø25, ø28

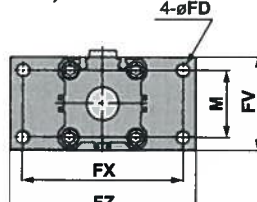


Rear flange type/MQQLG

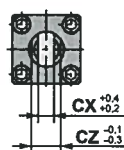
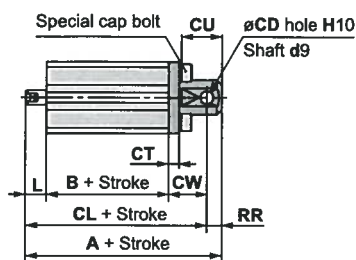
ø10, ø16, ø20



ø25, ø28



Double clevis type/MQQLD



Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	L	LD	LG	LH
10	10 to 40	74.3	61.5	8	4.5	2.8	19
16	10 to 60	87.7	70.5	10	6.6	4	24
20	10 to 60	96.2	79	10	6.6	4	26
25	10 to 50, 75, 100	103.7	84.5	12	6.6	4	30
28	10 to 50, 75, 100	123.2	104	12	6.6	4	33

Bore size (mm)	LS	LT	LX	LY	LZ	X	Y
10	49.5	2	38	33.5	48	8	5
16	58.5	3.2	48	42	62	9.2	5.8
20	64	3.2	52	46	66	10.7	5.8
25	68.5	3.2	57	57	71	11.2	5.8
28	88	3.2	64	64	78	11.2	7

Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	FD	FT	FV	FX
10	10 to 40	79.5	61.5	4.5	5.5	30	45
16	10 to 60	90.5	70.5	6.6	8	39	48
20	10 to 60	99	79	6.6	8	42	52
25	10 to 50, 75, 100	106.5	84.5	5.5	8	48	56
28	10 to 50, 75, 100	126	104	5.5	8	54	62

Bore size (mm)	FZ	L	M
10	55	18	—
16	60	20	—
20	64	20	—
25	65	22	34
28	72	22	40

Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	L
10	10 to 40	75	8
16	10 to 60	88.5	10
20	10 to 60	97	10
25	10 to 50, 75, 100	104.5	12
28	10 to 50, 75, 100	124	12

(Dimensions other than A and L are the same as the front flange type.)

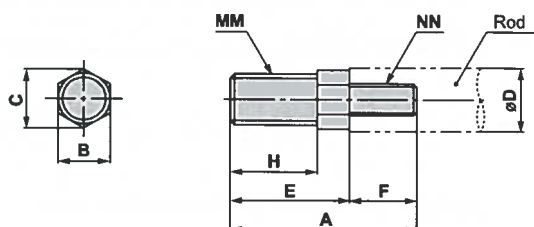
Bore size (mm)	Stroke range (mm)	A	B	CD	CL	CT	CU
10	10 to 40	90.5	61.5	5	84.5	4	10
16	10 to 60	107.5	70.5	8	98.5	5	12
20	10 to 60	119	79	10	109	5	14
25	10 to 50, 75, 100	126.5	84.5	10	116.5	5	14
28	10 to 50, 75, 100	148	104	10	138	6	14

Bore size (mm)	CW	CX	CZ	L	RR
10	15	6.5	12	8	6
16	18	8	16	10	9
20	20	10	20	10	10
25	20	18	36	12	10
28	22	18	36	12	10

Series MQQ

Accessory Dimensions

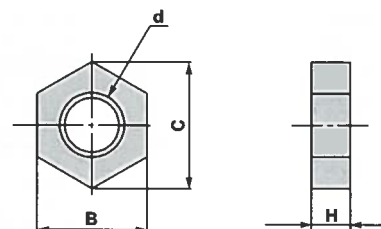
Rod end thread adapter



Part no.	Applicable bore size (mm)	A	B	C	D	E	F
MQ10-M	10	20.5	8	9.2	6	15.5	5
MQ16-M	16	22.5	8	9.2	8	16.5	6
MQ20-M	20	24.5	8	9.2	10	18.5	6
MQ25-M	25	33.5	10	11.5	12	22.5	11
MQ28-M	28	40.5	14	16	16	28.5	12

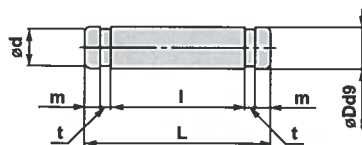
Part no.	Applicable bore size (mm)	H	MM	NN
MQ10-M	10	10.5	M5 x 0.8	M3 x 0.5
MQ16-M	16	11.5	M6 x 1.0	M4 x 0.7
MQ20-M	20	13.5	M8 x 1.25	M5 x 0.8
MQ25-M	25	16.5	M10 x 1.25	M6 x 1.0
MQ28-M	28	22.5	M14 x 1.5	M8 x 1.25

Rod end nut



Part no.	Applicable bore size (mm)	B	C	d	H
NTJ-015A	10	8	9.2	M5 x 0.8	4
NT-015A	16	10	11.5	M6 x 1.0	5
NT-02	20	13	15	M8 x 1.25	5
NT-03	25	17	19.6	M10 x 1.25	6
NT-04	28	22	25.4	M14 x 1.5	8

Clevis pin part numbers



Part no.	Applicable bore size (mm)	Dd9	L	d	l	m	t	Applicable snap ring
IY-J015	10	5 ^{+0.030} _{-0.040}	16.6	4.8	12.2	1.5	0.7	C type 5 for shaft
IY-G02	16	8 ^{+0.040} _{-0.076}	21	7.6	16.2	1.5	0.9	C type 8 for shaft
IY-G03	20	10 ^{+0.040} _{-0.076}	25.6	9.6	20.2	1.55	1.15	C type 10 for shaft
IY-G04	25, 28	10 ^{+0.040} _{-0.076}	41.6	9.6	36.2	1.55	1.15	C type 10 for shaft

Anexo H: Catálogo da Válvula Reguladora de Pressão de Precisão Utilizada

Regulator

New
RoHS

Air
consumption

Bleed air
“0”

Lightweight

Reduced by up to approx. 27 %*
[kg]

Series	Current model	New IR
IR1200-A	0.14	0.13
IR2200-A	0.30	0.23
IR3200-A	0.64	0.47

* Compared with the current IR1000/2000/3000

High flow
rate

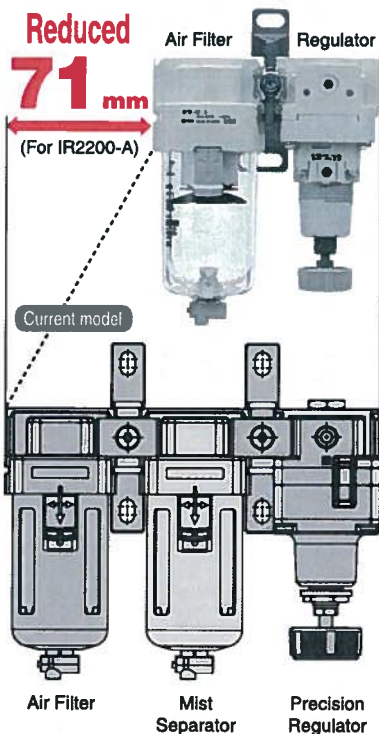
Up to approx. twice*
[l/min (ANR)]

Series	Current model	New IR
IR1200-A	320	720
IR2200-A	940	1900
IR3200-A	4000	5000

* Compared with the current IR1000/2000/3000

Space saving

New structure without fixed throttle
does not require a mist separator.



Series IR1200-A/2200-A/3200-A

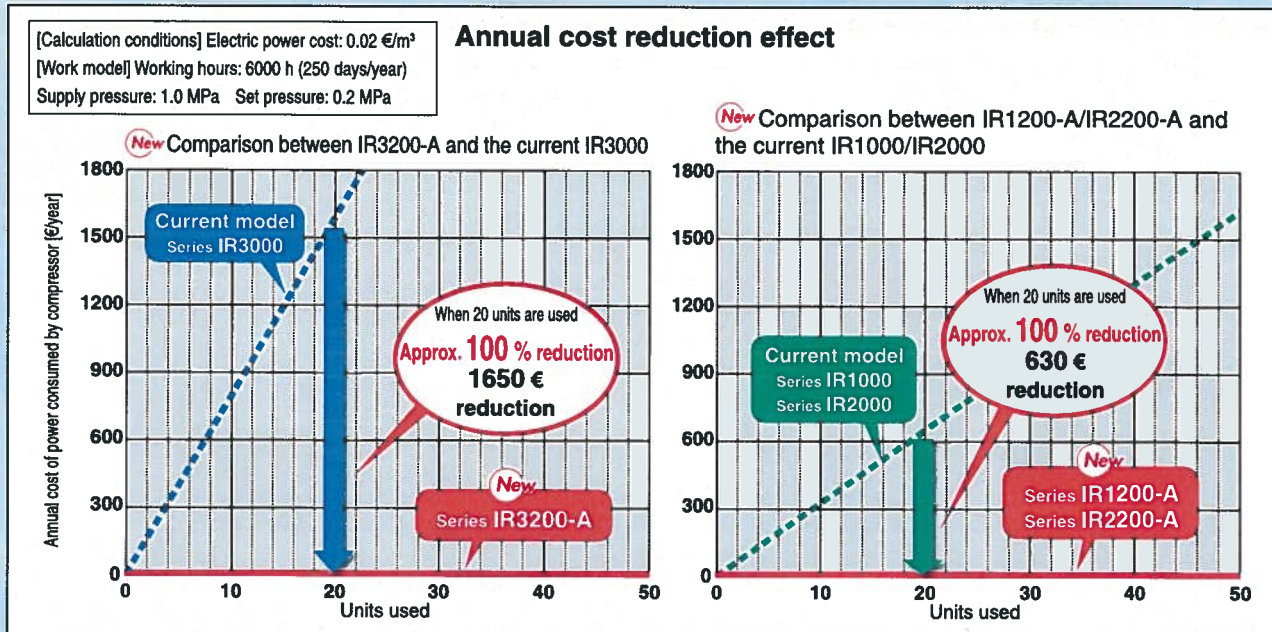


CAT.EUS60-24A-UK

Reduction in air consumption

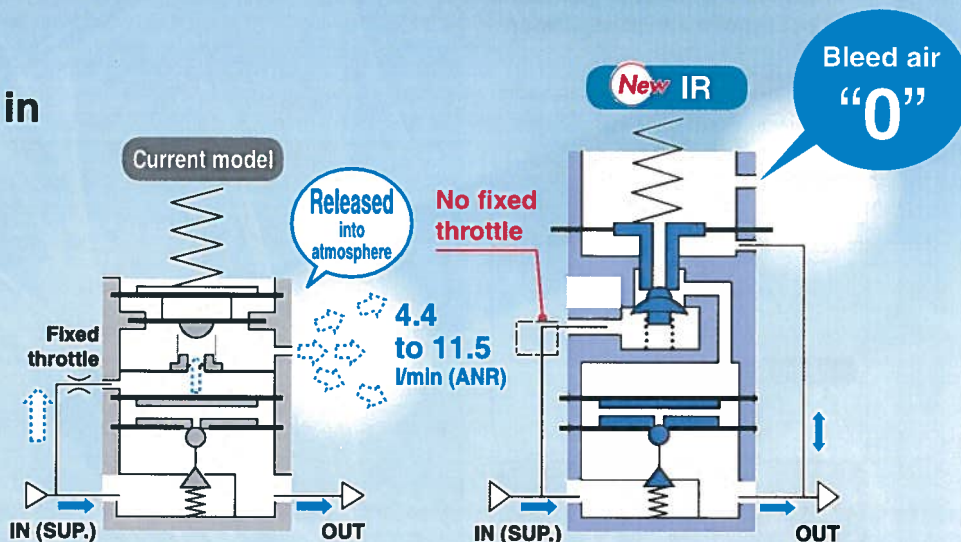
● Air consumption is reduced with a new original structure.

With this new original structure, running costs are reduced.



● No fixed throttle in the new design.

* Poor quality of air may cause operation failure. Select a model for air quality that is suitable for the desired air cleanliness in catalogue on SMC website www.smc.eu

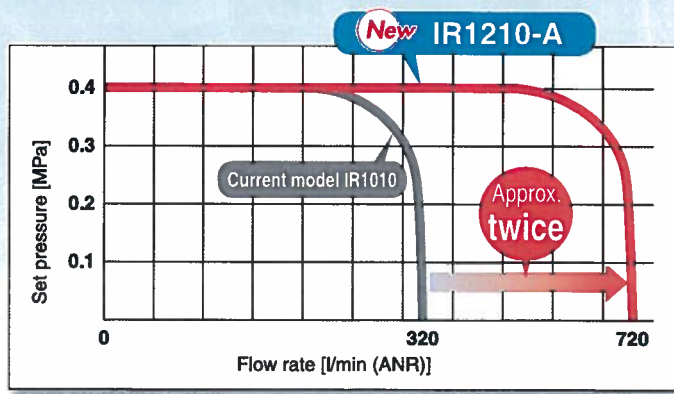


● Flow rate: Up to approx. twice

(Compared to the current SMC product) [l/min (ANR)]

Series	Current model	New IR
IR1200-A	320	720
IR2200-A	940	1900
IR3200-A	4000	5000

Supply pressure: 0.7 MPa



Supply pressure: 0.7 MPa

Weight
Reduced by up to approx. **27 %** [kg]

Series	Current model	New IR
IR1200-A	0.14	0.13
IR2200-A	0.30	0.23
IR3200-A	0.64	0.47



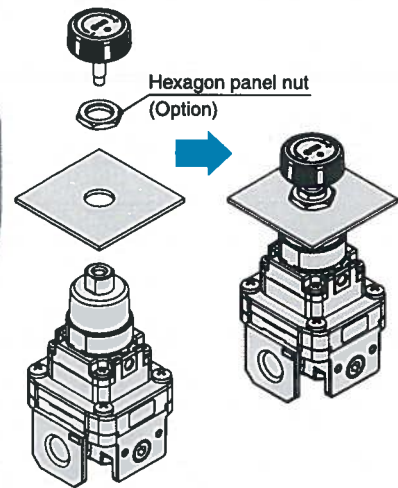
Digital pressure switch standardised



Pressure gauge

Hexagon panel nut mounting

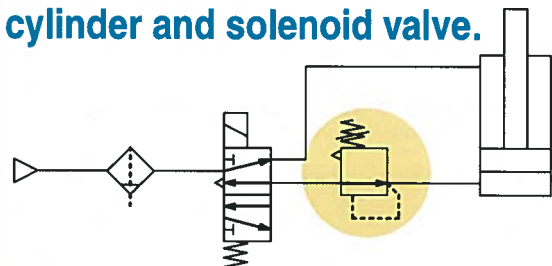
* Interchangeable with the current SMC product



Repeatability: ± 1 % (Full span)

Mounting is interchangeable with the current SMC model.

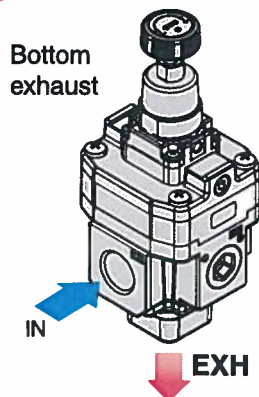
New IR can be used between a cylinder and solenoid valve.



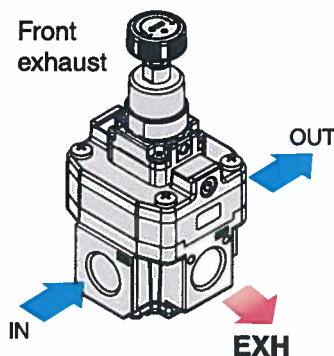
Note) The set pressure may vary depending on the elapsed time and change in ambient temperature after pressure setting. If the setting value varies, adjust the pressure with the knob.

Exhaust (EXH) directions can be selected. (Series IR3200-A)

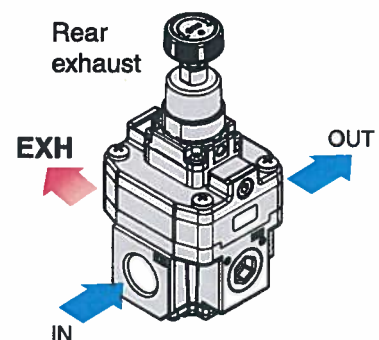
New Bottom and front exhaust added.



Bottom exhaust



Front exhaust

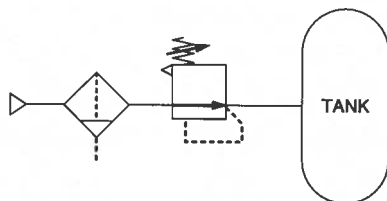


Rear exhaust

Application Examples

Constant fluid pressure

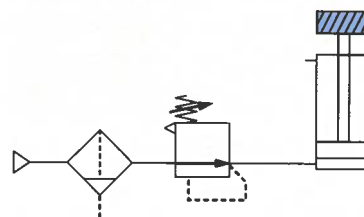
Note)



- As there is a large effective area for supply and exhaust pressure, setting can be done quickly.

Balance and drive Accurate balance pressure setting

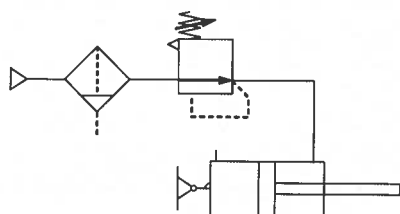
Note)



- Limits pressure fluctuation when driving a cylinder, maintaining excellent static and dynamic balance.

Contact pressure control

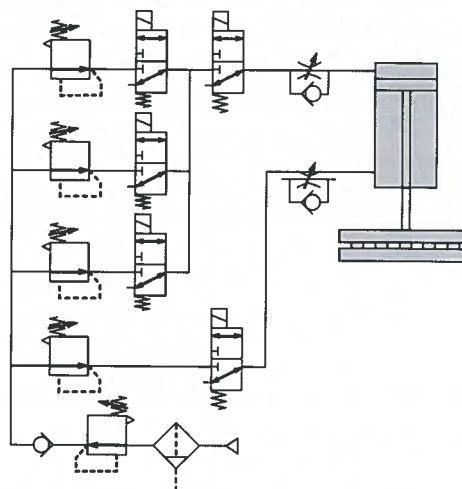
Note)



- Adapts to the cylinder's piston displacement, maintaining a constant pressure.

Multistage control of pressing force for workpiece (Wrapping machine)

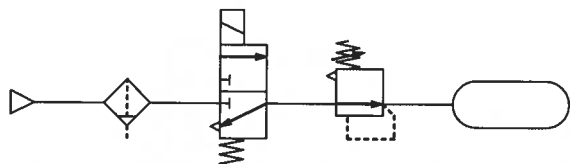
Note)



Residual pressure relief

Note)

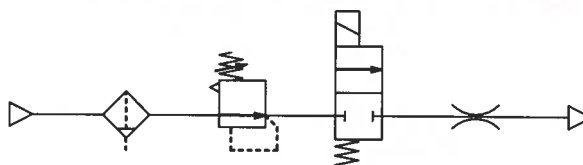
Ex.) Backflow from the tank



- Residual pressure is exhausted by relief function.
- It can be used between a cylinder and a solenoid valve.

Adjustment of blow-line pressure

Note)



- Outlet pressure is less affected by fluctuation of inlet pressure. New IR offers consistent pressure control.

Note) The set pressure may vary depending on the elapsed time and change in ambient temperature after pressure setting. If the setting value varies, adjust the pressure with the knob.

Series Variations

Basic Type (Knob)	Series	Model	Set pressure range [MPa]	Port size
	IR1200-A 	IR1200-A	0.02 to 0.2	1/8
		IR1210-A	0.02 to 0.4	
		IR1220-A	0.02 to 0.8	
	IR2200-A  	IR2200-A	0.02 to 0.2	1/4
		IR2210-A	0.02 to 0.4	
		IR2220-A	0.02 to 0.8	
	IR3200-A 	IR3200-A	0.02 to 0.2	1/4, 3/8, 1/2
		IR3210-A	0.02 to 0.4	
		IR3220-A	0.02 to 0.8	



Regulator

RoHS

Series IR1200-A/2200-A/3200-A

Symbol



Standard Specifications

Model	Basic type (Knob)		
	IR12□0-A	IR22□0-A	IR32□0-A
Fluid	Air		
Proof pressure	1.5 MPa		
Max. supply pressure	1.0 MPa		
Min. supply pressure ^{Note 1)}	Set pressure + 0.05 MPa		Set pressure + 0.1 MPa
Set pressure range	IR1200-A: 0.02 to 0.2 MPa	IR2200-A: 0.02 to 0.2 MPa	IR3200-A: 0.02 to 0.2 MPa
	IR1210-A: 0.02 to 0.4 MPa	IR2210-A: 0.02 to 0.4 MPa	IR3210-A: 0.02 to 0.4 MPa
	IR1220-A: 0.02 to 0.8 MPa	IR2220-A: 0.02 to 0.8 MPa	IR3220-A: 0.02 to 0.8 MPa
Repeatability ^{Note 2)}	Within ±1 % of full span		
Port size	1/8	1/4	1/4, 3/8, 1/2
Pressure gauge port	1/8 (2 locations)		
Ambient and fluid temperature ^{Note 3)}	-5 to 60 °C (No freezing)		
Weight [kg] ^{Note 4)}	0.13	0.23	0.47

Note 1) When there is no flow rate on the outlet.

Note 2) Other characteristics such as aging deterioration and temperature characteristics are not included.

Note 3) -5 to 50 °C for the products with the digital pressure switch

Note 4) Without accessories

Accessories (Option)/Part No.

Description	IR12□0-A	IR22□0-A	IR32□0-A
Bracket assembly ^{Note 1)}	IR10P-501AS	IR20P-501AS	IR30P-501AS
Hexagon panel nut	IR10P-600S	IR20P-600S	IR20P-600S
Round type pressure gauge ^{Note 2)}	0.2 MPa setting	G33-2-□01	G43-2-□01
	0.4 MPa setting	G33-4-□01	G43-4-□01
	0.8 MPa setting	G33-10-□01	G43-10-□01
Digital pressure switch ^{Note 3)}	NPN 1 output	ISE30A-□01-N-ML	
	PNP 1 output	ISE30A-□01-P-ML	
	NPN 1 output/ Voltage output	ISE30A-□01-C-ML	
	NPN 1 output/ Current output	ISE30A-□01-D-ML	

Note 1) This is an assembly of the bracket and resin panel nut.

Note 2) □ in part numbers for a round type pressure gauge indicates a type of connection thread. No indication is necessary for R; however, indicate N for NPT.
A 1.0 MPa pressure gauge is fitted for 0.8 MPa setting.
Please contact SMC regarding the supply of pressure gauge with psi unit specifications.

Note 3) □ in part numbers for a digital pressure switch indicates a type of connection thread. No indication is necessary for R; however, indicate N for NPT. For details on handling digital pressure switch and specifications, refer to the **WEB catalogue** in www.smc.eu. Please contact SMC regarding the supply of digital pressure switch with unit conversion function.

Modular Products and Accessories

Applicable products and accessories	Applicable size		
	Series IR1200-A	Series IR2200-A	Series IR3200-A
Filter	AF20-A	AF30-A	AF40-A
Spacer	Y200-A	Y300-A	Y400-A
Spacer with bracket	Y200T-A	Y300T-A	Y400T-A

Refer to the **WEB catalogue** for details of the modular applicable products and accessories. The former modular and mounting brackets can be used.

Regulator *Series IR1200-A/2200-A/3200-A*

How to Order

IR **1** **2** **0** **0** - **01** **BG** - **—** - **A**

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦



- Option/Semi-standard: Select one each for a to f. Options b and c cannot be selected together.
- Option/Semi-standard symbol: When more than one specification is required, indicate in alphanumeric order.

		Symbol	Description	①			
				Body size			
				1	2	3	
②	Set pressure range	0	0.02 to 0.2 MPa	●	●	●	
		1	0.02 to 0.4 MPa	●	●	●	
		2	0.02 to 0.8 MPa	●	●	●	
		+					
③	Exhaust direction	0	Bottom exhaust	●	●	●	
		1	Front exhaust	—	—	●	
		2	Rear exhaust	—	—	●	
		+					
④	Pipe thread type	—	Rc	●	●	●	
		N	NPT	●	●	●	
		F	G	●	●	●	
		+					
⑤	Port size	01	1/8	●	—	—	
		02	1/4	—	●	●	
		03	3/8	—	—	●	
		04	1/2	—	—	●	
		+					
⑥	a	Mounting	—	Without mounting option	●	●	●
			B <small>Note 2)</small>	With bracket	●	●	●
			H	With hexagon panel nut (for panel mount)	●	●	●
			+				
	b	Pressure gauge	—	Without pressure gauge	●	●	●
			G	Round type pressure gauge	●	●	●
	c	With digital pressure switch	EA	NPN open collector 1 output	●	●	●
			EB	PNP open collector 1 output	●	●	●
			EC	NPN open collector 1 output + Analogue voltage output	●	●	●
			ED	NPN open collector 1 output + Analogue current output	●	●	●
		+					
⑦	d	Flow direction	—	Flow direction: Left to right	●	●	●
			R	Flow direction: Right to left	●	●	●
			+				
	e	Knob	—	Upward	●	●	●
			V	Downward	●	●	●
			+				
	f	Pressure unit <small>Note 3)</small>	—	Name plate and pressure gauge in imperial units: MPa	●	●	●
			Z	Name plate and pressure gauge in imperial units: psi	●	●	●
			ZA	Digital pressure switch: With unit conversion function	●	●	●

Note 1) Options are shipped together with the product, but not assembled. B and H cannot be selected at the same time. The current bracket cannot be used for this product.

Note 2) Assembly of a bracket and set nuts.

Note 3) See pressure unit table below.

	Pipe thread type	Name plate in imperial units	Pressure gauge in imperial units	
			G	EA, EB, EC, ED
—	Rc	MPa	MPa	Fixed SI unit
	NPT			
	G			
Z Note 4)	Rc	psi	psi	With unit conversion function (Initial value psi)
	NPT			
	G			
ZA Note 5)	Rc	MPa	—	With unit conversion function
	NPT			
	G			

Note 4) For pipe thread type: NPT

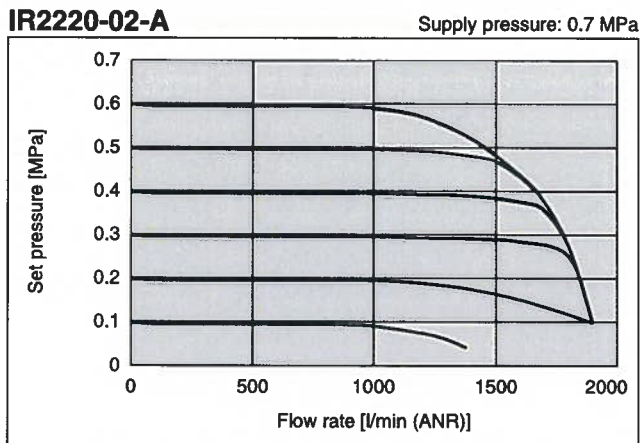
Note 5) For options: EA, EB, EC, ED

Regulator *Series IR1200-A/2200-A/3200-A*

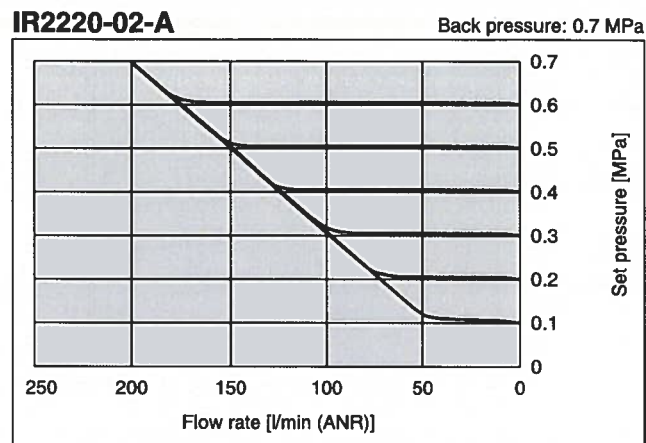
Series IR2200-A

* The data shown below are representative values, and are not guaranteed.

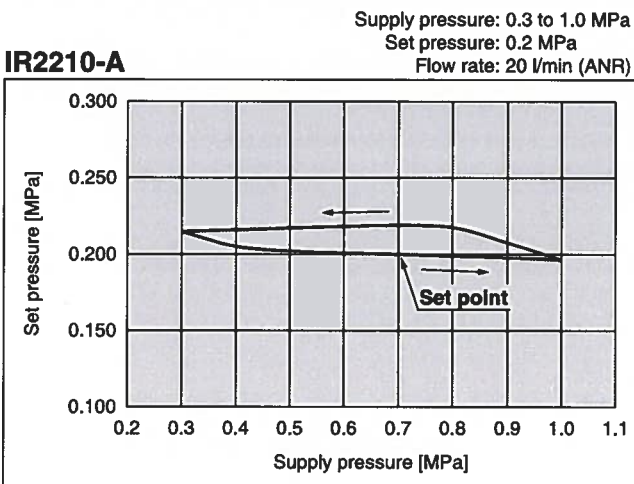
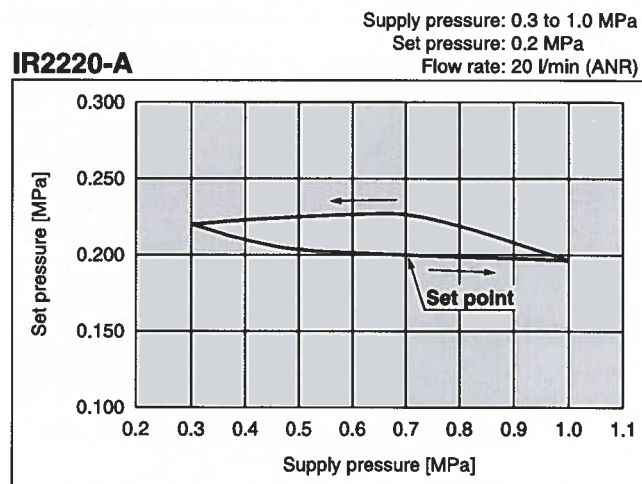
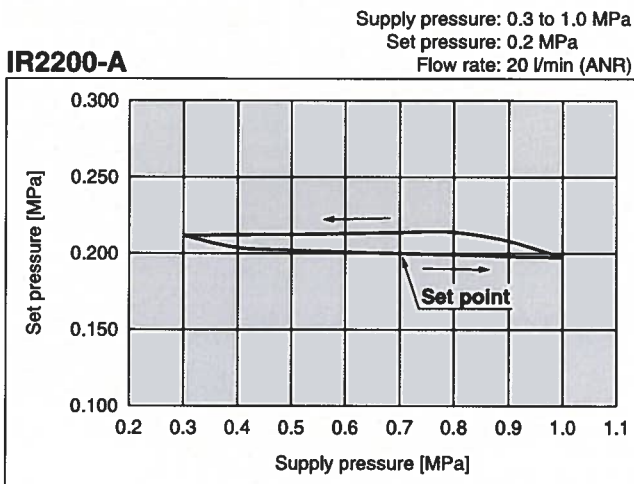
Flow-rate Characteristics



Relief Characteristics

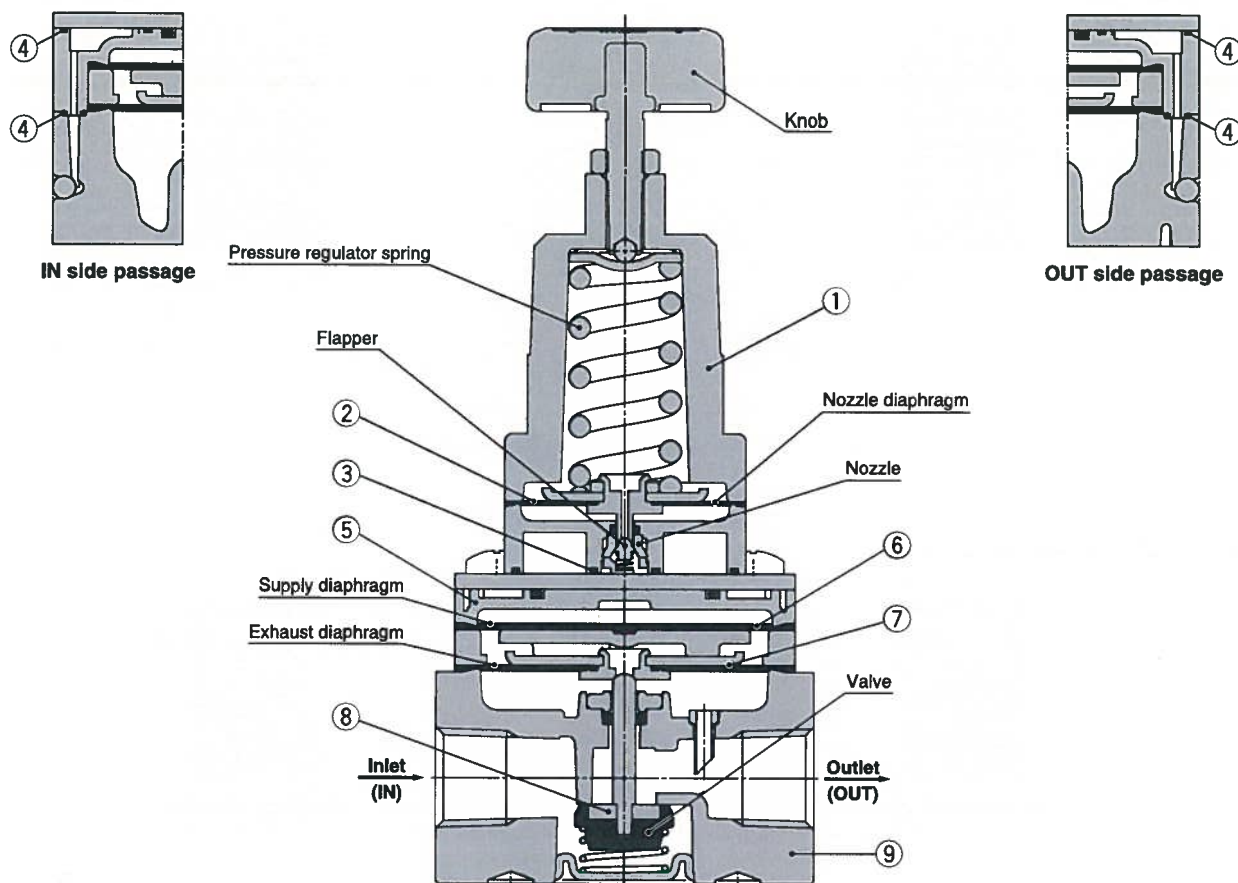


Pressure Characteristics



Construction

Basic type (Knob): IR22□0-A



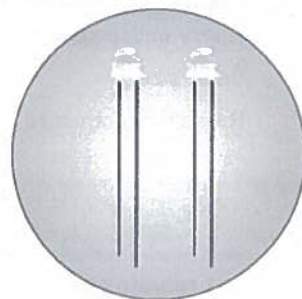
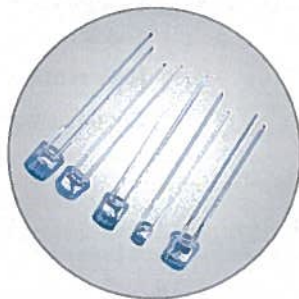
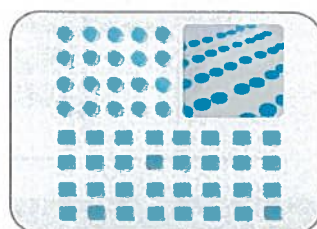
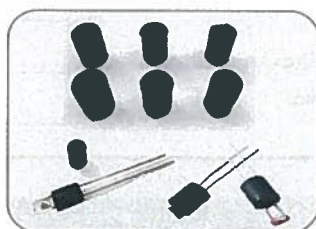
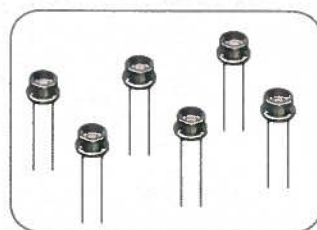
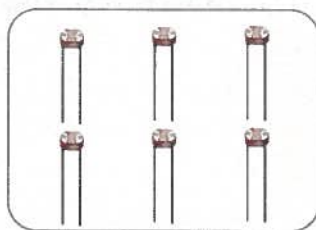
Working principle

When the knob is rotated, the flapper is pushed through the spring, and a gap is generated between the nozzle and flapper. The supply pressure flows to the inlet passes through the path between the nozzle and flapper and acts on the supply diaphragm as nozzle back pressure. The force generated by the diaphragm pushes down the valve, and the supply pressure flows to the outlet. The discharged air pressure acts on the exhaust diaphragm, and counteracts against the force generated by the supply diaphragm. The air pressure acts on the nozzle diaphragm at the same time, and counteracts against the compression force of the spring to adjust the set pressure. When the set pressure increases too much, the nozzle diaphragm is pushed up, and a gap is generated between the flapper and nozzle diaphragm after the flapper is closed. The balance of the supply diaphragm and exhaust diaphragm is lost when the nozzle back pressure flows into the atmosphere. The exhaust valve is open after the valve is closed, and excess pressure on the outlet is released to the air. Due to this pilot mechanism, pressure variations are detected and pressure adjustment is possible.

Component Parts

No.	Description	Material		
		IR1200-A	IR2200-A	IR3200-A
1	Bonnet	Aluminium die-casted		
2	Nozzle diaphragm assembly	Aluminium, Weather resistant NBR		
3	Seal	HNBR		
4	Seal	NBR		
5	Diaphragm spacer	Polyacetal		
6	Supply diaphragm	Weather resistant NBR		—
7	Exhaust diaphragm assembly	Steel, Aluminium, Weather resistant NBR		Aluminium, Weather resistant NBR,
8	Valve assembly	Stainless steel, Aluminium, HNBR		Aluminium, HNBR
9	Body	Aluminium die-casted		

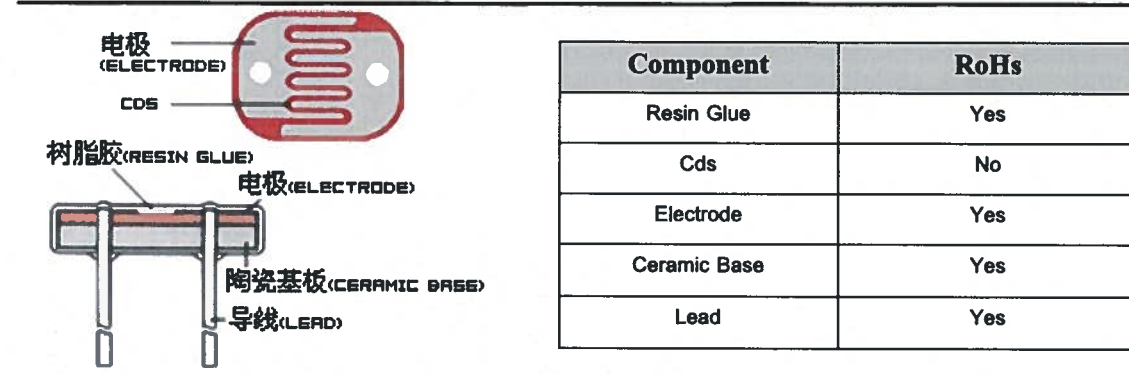
Anexo I: Ficha Técnica das Fotorresistências Utilizadas



Description:

Photoconductive cells are sensors that allow you to detect light. They are small, inexpensive, low-power, easy to use and don't wear out. They are often referred to as CdS cells (they are made of Cadmium-Sulfide), light-dependent resistors (LDR), and photoresistors. whose resistance decreases with increasing incident light intensity. In other words when it is dark it has a high electrical resistance and when it is light it has a low electrical resistance.

Structure:



Features:

- Epoxy encapsulated
- Small size
- Reliable performance
- Quick response
- High sensitivity
- Good characteristic of spectrum

Terms:

■ Light resistance:

Measured at 10Lux with standard light A (2854K color) color temperature) and 2H pre-illumination at 400–600lux prior to testing.

■ Dark resistance: Measured 10 seconds after pulsed 10lux

■ Gamma Characteristic:

Between 10Lux and 100Lux and given by $T = \frac{\log(R_{10} / R_{100})}{\log(100/10)} = \log(R_{10} / R_{100})$

R_{10} , R_{100} cell resistance at 10Lux and 100Lux. The error of T is ± 0.1

■ Pmax: Max. Power dissipation at ambient temperature of 25°C

■ Vmax: Max. Voltage in darkness that may be applied to the cell continuously.

Typical Applications:

Digital Applications:

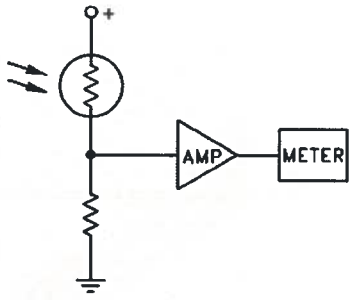
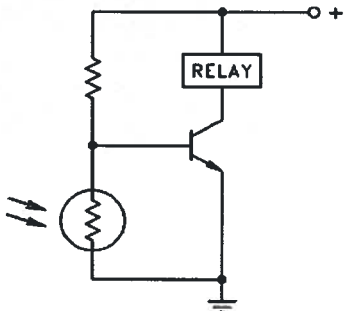
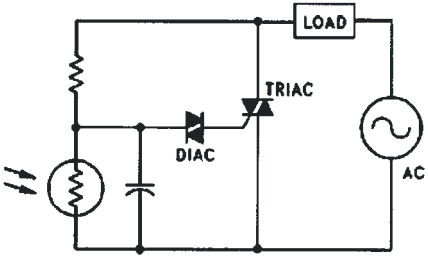
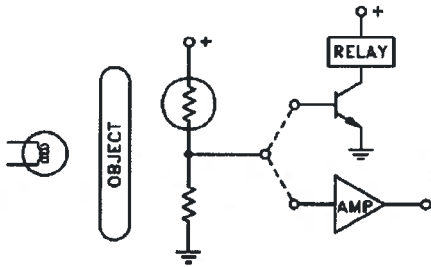
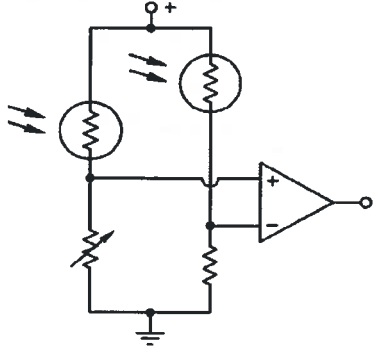
- ◆ Automatic headlight dimmer
- ◆ Night /street light control
- ◆ Photoelectric control
- ◆ Industrial control
- ◆ Security system

- ◆ Light-controlled toys/ switch

Analog Applications:

- ◆ Camera exposure control
- ◆ Automatic Gain Control

Typical Application Circuit:

	<p>Used in, eg,</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Ambient light detecting</i> <i>Camera auto exposure control</i>
	<p>Used in, eg,</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Backlight control</i> <i>Light adjusting application</i>
	<p>Used in, eg,</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Small Night Light</i> <i>Street Light</i> <i>Flame Detector</i>
	<p>Used in, eg,</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Security System</i> <i>Colorimetric devices</i> <i>Densitometer</i>
	<p>Used in, eg,</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Light intensity control</i> <i>Automatic Focusing</i> <i>Electronic Balance</i> <i>Light-control system</i>

■ Illuminance vs. Resistance:

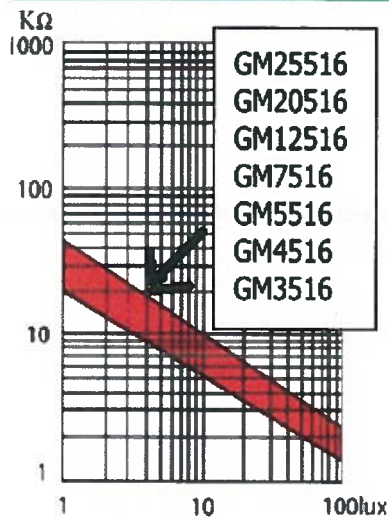


Fig. 1

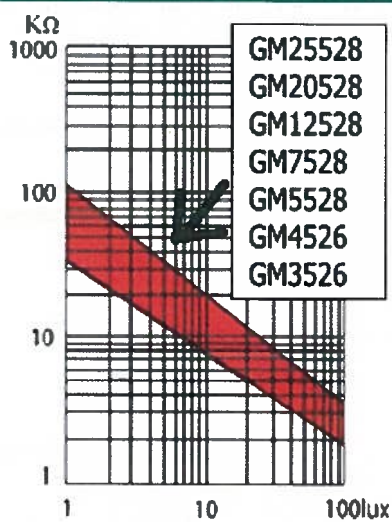


Fig. 2

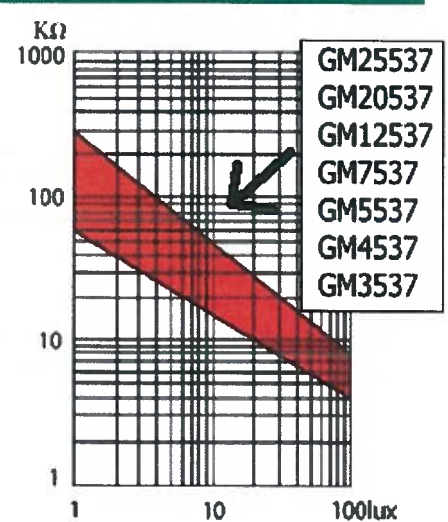


Fig. 3

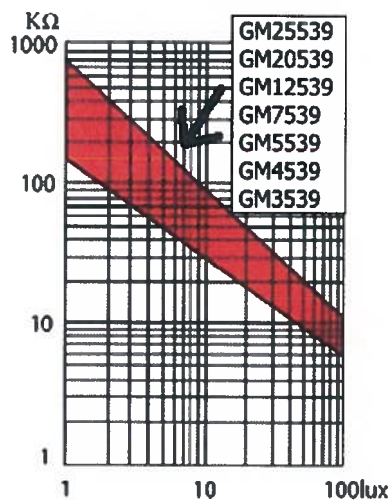


Fig. 4

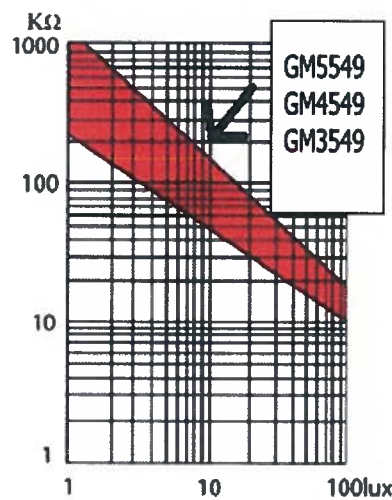
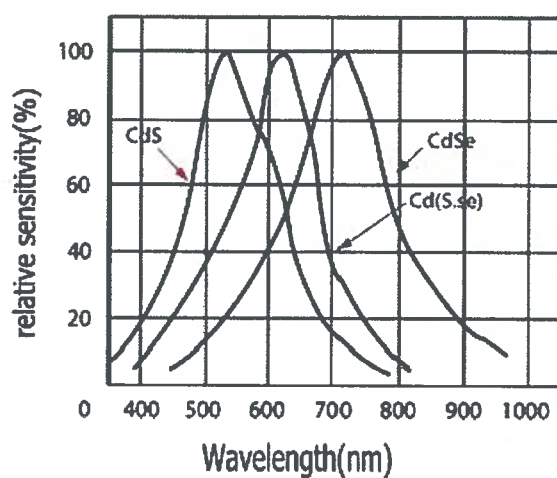
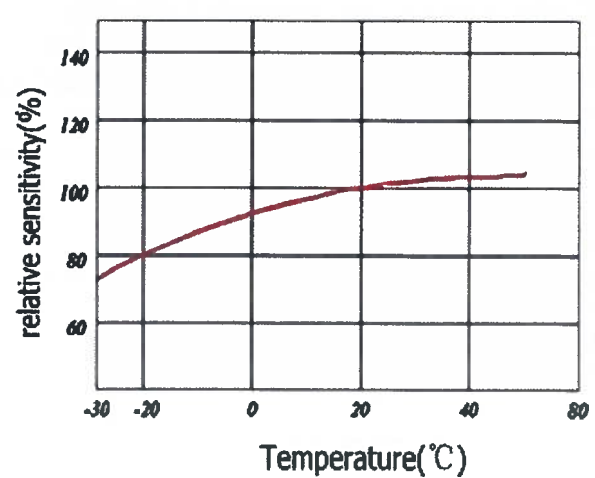


Fig. 5


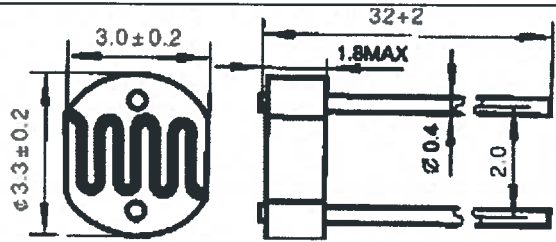

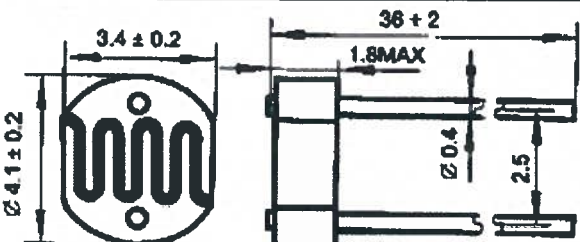

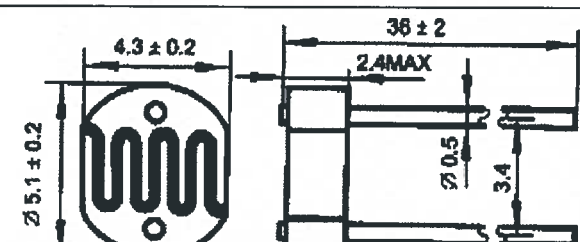

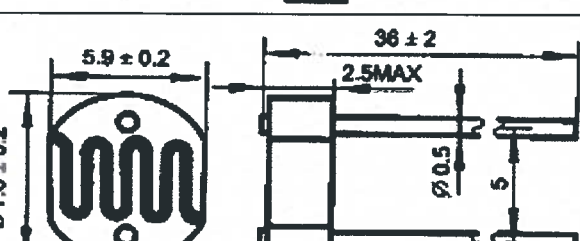

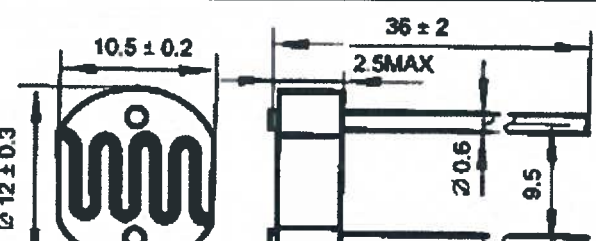

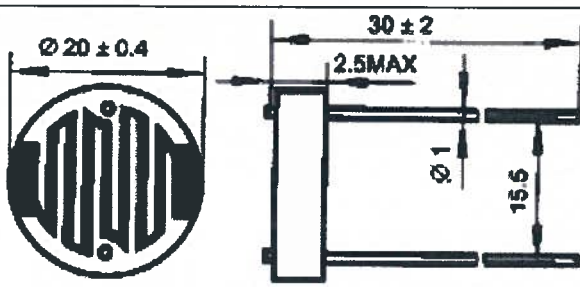

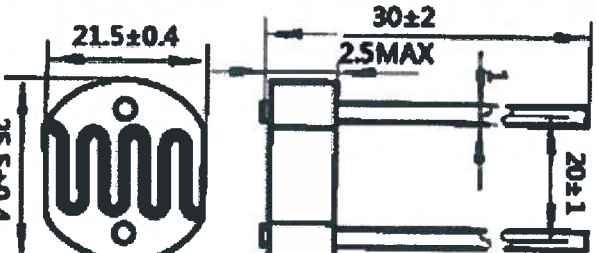
■ Spectral Response curve:



■ Temperature vs. Relative sensitivity



Pictures & Dimentions(Unit:mm)

GM35 SERIES		
GM45 SERIES		
GM55 SERIES		
GM75 SERIES		
GM125 SERIES		
GM205 SERIES		
GM255 SERIES		

Parameters of Cds photoresistor:

Items	Type	Max Voltage (VDC)	Power Dissipation (mw)	Ambient Temperature Range(°C)	Spectral Response peak(nm)	Light Resistance (10Lux)(K Ω)	Dark Resistance (M Ω)	$\gamma_{\frac{100}{10}}$	Response time(ms)		Illuminance resistance Characterist
									Increase	Decrease	
GM35 Series	GM3516	100	50	-30~+70	540	5-10	0.6	0.5	30	30	1
	GM3526	100	50	-30~+70	540	10-20	1	0.6	30	30	2
	GM3537-1	100	50	-30~+70	540	20-30	2	0.6	30	30	3
	GM3537-2	100	50	-30~+70	540	30-50	3	0.7	30	30	3
	GM3547-1	100	50	-30~+70	540	50-100	5	0.8	30	30	4
	GM3547-2	100	50	-30~+70	540	100-200	10	0.9	30	30	5
GM45 Series	GM4516	100	50	-30~+70	540	5-10	0.6	0.5	30	30	1
	GM4526	100	50	-30~+70	540	10-20	1	0.6	30	30	2
	GM4537-1	100	50	-30~+70	540	20-30	2	0.6	30	30	3
	GM4537-2	100	50	-30~+70	540	30-50	3	0.7	30	30	3
	GM4539	100	50	-30~+70	540	50-100	5	0.8	30	30	4
	GM4549	100	50	-30~+70	540	100-200	10	0.9	30	30	5
GM55 Series	GM5516	150	90	-30~+70	540	5-10	0.5	0.5	30	30	1
	GM5528	150	100	-30~+70	540	10-20	1	0.6	30	30	2
	GM5537-1	150	100	-30~+70	540	20-30	2	0.6	30	30	3
	GM5537-2	150	100	-30~+70	540	30-50	3	0.7	30	30	3
	GM5539	150	100	-30~+70	540	50-100	5	0.8	30	30	4
	GM5549	150	100	-30~+70	540	100-200	10	0.9	30	30	5
GM75 Series	GM7516	150	90	-30~+70	540	5-10	0.5	0.6	30	30	1
	GM7528	150	100	-30~+70	540	10-20	1	0.6	30	30	2
	GM7537-1	150	150	-30~+70	560	20-30	2	0.7	30	30	3
	GM7537-2	150	150	-30~+70	560	30-50	4	0.8	30	30	3
	GM7539	150	150	-30~+70	560	50-100	8	0.8	30	30	4
GM125 Series	GM12516	250	200	-30~+70	560	5-10	1	0.6	30	30	1
	GM12528	250	200	-30~+70	560	10-20	2	0.6	30	30	2
	GM12537-1	250	200	-30~+70	560	20-30	3	0.7	30	30	3
	GM12537-2	250	200	-30~+70	560	30-50	5	0.7	30	30	3
	GM12539	250	200	-30~+70	560	50-100	8	0.8	30	30	4
GM205 Series	GM20516	500	500	-30~+70	560	5-10	1	0.6	30	30	1
	GM20528	500	500	-30~+70	560	10-20	2	0.6	30	30	2
	GM20537-1	500	500	-30~+70	560	20-30	3	0.7	30	30	3
	GM20537-2	500	500	-30~+70	560	30-50	5	0.7	30	30	3
	GM20539	500	500	-30~+70	560	50-100	8	0.8	30	30	4
GM255 Series	GM25516	500	500	-30~+70	560	5-10	1	0.6	30	30	1
	GM25528	500	500	-30~+70	560	10-20	2	0.6	30	30	2
	GM25537-1	500	500	-30~+70	560	20-30	3	0.7	30	30	3
	GM25537-2	500	500	-30~+70	560	30-50	5	0.7	30	30	3
	GM50539	500	500	-30~+70	560	50-100	8	0.8	30	30	4

Size of package(Unit: mm):

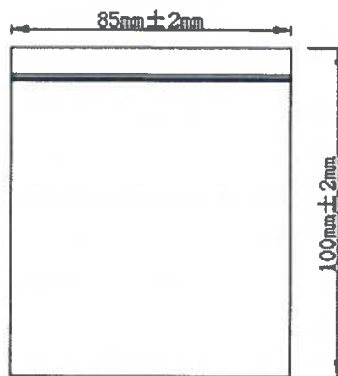


Fig.1:Bag

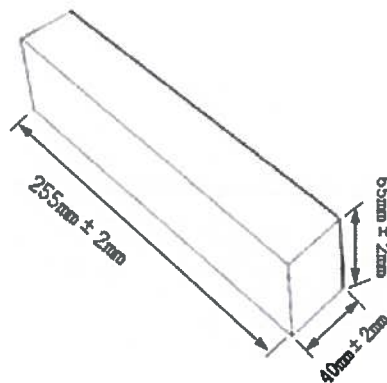


Fig.2:Box

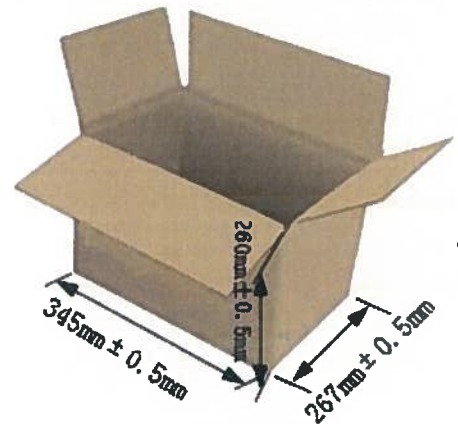


Fig.3:Bin

Items	Package Detail		
	Pcs/Bag	Bag/Box	Box/Bin
GM35	200	10	25
GM45	200		
GM55	200		
GM75	100		
GM125	50		
GM205	20		
GM255	10		



Shenzhen Wodeyijia Technology Co.,Ltd

深圳沃德一佳科技有限公司

Add: 6th floor, 9th building, Huali Industrial Park, Xinhe, Fuyong, Baoan, Shenzhen, China

Tel: +86 755 83753567

Fax: +86 755 82513850

Mobile: +86 186 7676 8269

Email: sydney0377@gmail.com

Website: www.szwdyj.com